



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE UMA ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS

Pedro Ivo Amaro Alves

Ouro Preto - MG
2020

Ouro Preto
2020
Pedro Ivo Amaro Alves

**EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE UMA
ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, do Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A474e Alves, Pedro Ivo Amaro .

Empilhamento de rejeito filtrado [manuscrito]: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. / Pedro Ivo Amaro Alves. - 2020.

114 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes Oliveira Filho.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto.

Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Resíduos industriais - Filtragem. 2. Disposição de rejeitos. 3. Barragens de rejeitos. I. Oliveira Filho, Waldyr Lopes. II. Silva, José Margarida da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

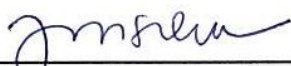
CDU 622.79

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

**“EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE
UMA ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS”**

AUTOR: PEDRO IVO AMARO ALVES

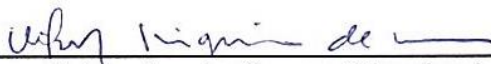
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 31 de janeiro de 2020, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. José Margarida Silva (Orientador) – UFOP



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Membro) – UFOP



Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa (Membro) – AUTÔNOMO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pelas bênçãos concedidas a cada dia, não somente a mim, mas a toda minha família e amigos.

Aos meus pais, Alcindo e Rubênia, ao meu irmão Marcos e aos meus avós Eunice e Damião, pelo amor incondicional e aos demais familiares e amigos pelo apoio e compreensão diante das minhas frequentes ausências.

Aos professores José Margarida e Waldyr Lopes, pela orientação e paciência.

Aos professores Trigueiro, Hernani e José Aurélio pelas recomendações e pela atenção.

Aos demais professores e funcionários do DEMIN pela receptividade e apoio.

Aos amigos(as): Adriano Henrique, Pedro Guilherme, Amanda, Mayra e Caroline, pela amizade e apoio durante o mestrado.

Aos amigos e primos de EJC, pelo companheirismo, confiança e paciência.

Ao meu primo Christian, pela amizade e auxílio na realização desta pesquisa.

Ao César, ao Rodrigo e ao Leone, colaboradores da CSN, pela ajuda e compartilhamento de informações fundamentais para a realização desse trabalho.

Aos companheiros Viclogan, Pedro Lincoln, Izabel e Luiz, da Nexa, pela parceria e colaboração fundamental para a realização desse trabalho.

À Naia e ao Alessandro pela receptividade e compartilhamento de informações.

Aos meus chefes e colegas de trabalho, em especial Thamires, Dalva, Conceição, Alair e Lucas, pelo incentivo, cooperação e compreensão.

À UFOP, por proporcionar oportunidades e condições para a capacitação de seus funcionários.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante o primeiro ano de mestrado.

*“Guardemos a fé, custe o que custar!
Guardemos a fé!”*

Cônego José Feliciano da Costa Simões

RESUMO

O assunto rejeitos de mineração tem sido frequentemente discutido pela indústria e pela sociedade civil. Após as rupturas das barragens das minas Germano e Córrego do Feijão, instalou-se um estado de alerta no Brasil e especialmente nos estados brasileiros com maior concentração de minas. O método convencional de disposição de rejeito vem sofrendo duras críticas e passou a ser questionado até mesmo por profissionais da área. A dificuldade enfrentada por empresas de mineração para a obtenção das licenças para alteamento ou construção de barragens de rejeitos se tornou muito maior. Ao mesmo tempo, as próprias empresas mineradoras já vinham procurando desenvolver técnicas mais seguras para a disposição de rejeitos. Uma dessas técnicas, o empilhamento de rejeito filtrado (ou *dry stacking*), vem se destacando no cenário atual como uma possibilidade à substituição do método convencional. A possibilidade de se empilhar o rejeito como se fora um depósito de estéril, além de diminuir a extensão da área afetada, proporciona uma estrutura com menor potencial de dano. Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta detalhes e informações importantes quando se considera a aplicação dessa técnica. Além da revisão conceitual, são apresentados exemplos de empreendimentos e projetos de aplicação da técnica que possibilitam reconhecer as características, vantagens, desvantagens, precauções e necessidades, tanto específicos de cada empreendimento, quanto inerentes à execução desse método de disposição. Considerando esse último caso, sem excluir outras providências, como análise criteriosa de custos de capital e operacional, observa-se a importância de: manter-se o controle sobre a densidade e granulometria da polpa que alimenta a planta de filtração; utilizar tecido filtrante de alta durabilidade e eficiência; disponibilizar local dentro da planta de filtração para realização das trocas de placas/tecidos; disponibilizar ampla área próxima da pilha de rejeitos para armazenamento temporário do rejeito filtrado; utilizar-se o transporte por correias do rejeito filtrado entre a planta de filtração e o local de armazenamento temporário; propiciar eficiente sistema de drenagem que colete e desvie os fluxos de água existentes ao redor e na superfície da pilha de rejeitos.

Palavras-chave: rejeitos, filtração, empilhamento de rejeitos, codisposição.

ABSTRACT

Industry, civil society and the media have often discussed mining tailings. Following the rupture of the dams of the Germano and Córrego do Feijão mines, a state of alert have been established in Brazil and especially in the Brazilian states with the highest concentration of mines. The conventional tailings disposal method has come under severe criticism and has been questioned even by mining professionals. The difficulty faced by mining companies in obtaining permits for raising or building tailings dams has become much greater. At the same time, the mining companies themselves were already seeking to develop safer tailings disposal techniques. One of these techniques, the disposal of filtered tailings (dry stacking), has been highlighted in the current scenario as a possibility to replace the conventional method. The ability to stack the tailings as if it were a waste pile, in addition to reducing the footprint, provides a structure with less potential for damage. Within this context, the present work presents important details and information when considering the application of this technique. After the conceptual review are presented examples of enterprises and projects of application of the technique that allow us to recognize the characteristics, advantages, disadvantages, precautions and needs, both specific to each undertaking, and inherent to the implementation of this disposal method. Considering the latter case, without excluding other measures, such as careful analysis of capital and operating costs, it is important to: maintain control over the density and granulometry of the tailings that feeds the filtering plant; use filter cloth of high durability and efficiency; having a place inside the filtering plant to perform plate/tissue changes; having a large area close to the tailings stack for temporary storage of the filtered tailings; conveying the filtered tailings between the filtration plant and the temporary storage site; having an efficient drainage system that collects and deflects existing water flows around and on the surface.

Keywords: tailings, filtration, dry stacking, co-disposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito	20
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero.....	23
Figura 4.3 – Classificação de rejeito baseada na distribuição granulométrica.....	23
Figura 4.4 – Esquema comparativo entre formas de disposição de rejeito	27
Figura 4.5 – Perfil de depósito com alteamento a montante	29
Figura 4.6 – Perfil de depósito com alteamento a jusante	29
Figura 4.7 – Perfil de depósito com alteamento de linha de centro.....	30
Figura 4.8 – Exemplo de depósito de rejeito pelo método de empilhamento drenado.....	31
Figura 4.9 - Tipos de espessadores geralmente utilizados para o espessamento de rejeitos de minério de ferro	34
Figura 4.10– Seção típica de um espessador	35
Figura 4.11 – Tipos de rejeitos segundo a porcentagem de sólidos e respectivos modos de espessamento e transporte.	37
Figura 4.12 – Pilha de rejeito filtrado (<i>Dry stack</i>) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru ..	38
Figura 4.13 – Esquema simplificado de filtro prensa.....	41
Figura 4.14 – Esquema de filtro de disco	42
Figura 4.15 – Relação entre precipitação e taxa de produção de rejeitos do projeto da mina Magino em comparação com pilhas de rejeitos filtrados existentes e/ou comprovadamente viáveis.....	44
Figura 4.16 – Range de aplicação do método de disposição de rejeito filtrado em projetos existentes	45
Figura 4.17 – Exemplo de seção de pilha com divisão em duas zonas: estrutural e não-estrutural	51
Figura 4.18 – Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração.....	55
Figura 5.1 – Localizações de empreendimentos/projetos citados com aplicação de filtragem de rejeitos	59
Figura 5.2 – Exemplos de empreendimentos brasileiros destacados neste trabalho	59
Figura 5.3 – Planta de Filtragem de Rejeitos 1 da Mina Pau Branco com vista da antiga barragem de rejeitos e de condomínio habitacional próximo à mina.	61
Figura 5.4 – Filtro prensa alugado para aumento de produção na Mina Pau Branco.....	61
Figura 5.5 – Tanque de alimentação da Planta de Filtragem 1 da Mina Pau Branco.....	62

Figura 5.6 – Esboço da planta de filtragem e foto da descarga em uma das baias.....	63
Figura 5.7 – Material descarregado pelos filtros sendo retirado das baias por pá carregadeira	63
Figura 5.8 – Vista em planta de algumas das principais estruturas da Mina Pau Branco	64
Figura 5.9 – Descarga da polpa de rejeito no tanque pulmão de alimentação das plantas de filtragem de rejeito da Mina Casa de Pedra.....	67
Figura 5.10 – Distribuição granulométrica (% passante acumulada) da alimentação do planta de filtragem.....	68
Figura 5.11 – Vista geral da Planta de Filtragem 1 da Mina Casa de Pedra	68
Figura 5.12 – Empilhadeira radial utilizada para descarga no pátio de estocagem temporária.	69
Figura 5.13 – Placas de um dos filtros prensa da Planta de Filtragem de Rejeito 1 da Mina Casa de Pedra.....	70
Figura 5.14 – Primeira versão (de 2008) do plano diretor do projeto prevendo disposição convencional de rejeitos e cava a céu aberto para lavra do corpo Arex.....	72
Figura 5.15 – Layout com localização das principais estruturas presentes no atual Plano Diretor do Projeto Aripuanã.	74
Figura 5.16 – Seção B-B’ da Pilha 1 do Projeto Aripuanã.....	77
Figura 5.17 – Detalhe 1 da Seção B-B’ mostrando detalhes de estruturas previstas para a Pilha 1	77
Figura 5.18 – Mapa da Guatemala destacando a localização da Mina Escobal	79
Figura 5.19 – Precipitação média por mês em San Rafael Las Flores, a 3 km da Mina Escobal	81
Figura 5.20 – Rota simplificada do rejeito na Mina Escobal	82
Figura 5.21 – Empilhadeira radial para estocagem temporária do rejeito filtrado antes da pilha	82
Figura 5.22 – Layout com a localização de principais estruturas relacionadas ao rejeito.....	83
Figura 5.23 – Empilhamento e preparação do local ocorrendo em simultâneo no local de disposição de rejeitos filtrado da Mina Escobal	84
Figura 5.24 – Recuperação simultânea da pilha de rejeitos filtrado.....	85
Figura 5.25 – Vista aérea da pilha de rejeito filtrado da Mina Escobal	87
Figura 5.26 – Médias mensais de precipitação e temperaturas na região de Vazante.....	91
Figura 5.27 – Vista aérea de algumas das principais estruturas da Unidade Vazante.....	94

Figura 5.28 – Planta de filtragem e galpão de estocagem anexo ligados por correia transportadora	95
Figura 5.29 – Platô de secagem com vista para planta de filtragem	96
Figura 5.30 – Exemplo do modo de descarga de rejeito filtrado na pilha	97
Figura 5.31 – Regularização da camada utilizando-se motoniveladora	97
Figura 5.32 – Exemplo de estaca fixada para melhor orientação dos operadores da pilha	98
Figura 5.33 – Gradeamento de camada de rejeito por trator agrícola	98
Figura 5.34 – Compactação de camada de rejeito utilizando rolo pé de carneiro	99
Figura 5.35 – Selamento de camada de rejeito com rolo liso	99
Figura 5.36 – <i>Layout</i> final em planta da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante	101
Figura 5.37 – <i>Layout</i> final em 3D da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Classificação granulométrica.....	22
Tabela 4.2 – Classificação geoquímica de rejeitos.....	25
Tabela 4.3 – Mecanismos de filtragem.....	40
Tabela 4.4 – Variáveis que afetam a taxa de filtragem	46
Tabela 4.5 – Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e de fechamento).....	54
Tabela 4.6 – Quadro resumo comparando diferentes minas	57
Tabela 5.1 – Custos operacionais médios dos métodos de disposição de rejeito da Mina Casa de Pedra	71
Tabela 5.2 – Volumes e áreas ocupadas por cada uma das pilhas previstas para o Projeto Aripuanã.	76
Tabela 5.3 – Custos de Capital para expansão da produção da Mina Escobal.....	87
Tabela 5.4 – Custos de processamento da Mina Escobal por área	88
Tabela 5.5 – Custos de operações de superfície por tonelada de minério	89
Tabela 5.6 – Custos totais de operação por tonelada de minério	89
Tabela 5.7 – Comparativo entre os custos das alternativas estudadas para ampliação da vida útil da Unidade Vazante	92
Tabela 5.8 – Detalhamento de custos de capital do empilhamento de rejeitos filtrados da Unidade Vazante.....	93
Tabela 5.9 – Distribuição granulométrica do rejeito da Unidade Vazante.....	95
Tabela 5.10 – Parâmetros construtivos da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante....	100
Tabela 5.11 – Custos de operação mensais e anuais da disposição de rejeitos filtrados da Unidade Vazante.....	102
Tabela 5.12 – Comparativo de custos operacionais entre os métodos convencional e de empilhamento de rejeito filtrado para a Unidade Vazante	102
Tabela 6.1 – Resumo dos exemplos estudados	107

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

ABNT: Agência Brasileira de Normas Técnicas

ART: *Altered rock tailings* - Rejeitos de rochas alteradas

A\$: dólares canadenses (moeda)

CAPEX: custos de capital

CBA: Companhia Brasileira de Alumínio

CSN: Companhia Siderúrgica Nacional

CT: *Coarse tailings* - Rejeitos granulares

ETEI: Estação de Tratamento de Efluentes Industriais

EUA: Estados Unidos da América

FT: *Fine tailings* - Rejeitos finos

h: hora

HDPE: *Highdensity Polyethylene* - polietileno de alta densidade

HRT: Hard rock tailings - Rejeitos de rocha dura

IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD: International Commission On Large Dams

ITM: In The Mine (revista)

kW: quilowatt

LHD: *Load Haul Dump* – carregadeiras rebaixadas

m: metros

M_{água}: massa de água

M_{rejeito}: massa de rejeito seco

MEND: *Mine Environment Neutral Drainage Program*

MG: Minas Gerais

mm: milímetros

Mt: Milhões de toneladas

OPEX: custos de operação

Pa: Pascal

PEAD: polietileno de alta densidade

pH: potencial hidrogeniônico

R\$: reais (moeda)

SLR: SLR Consulting (Canada) Ltd.

t: tonelada(s)

tpd: toneladas por dia

U\$: dólares americanos (moeda)

UFT: *Ultra fine tailings* - Rejeitos ultrafinos

UTM: Unidade de Tratamento de Minérios

w_{geot} : teor de umidade geotécnico

SUMÁRIO

1.	Introdução	15
2.	Objetivos.....	16
3.	Materiais e métodos.....	17
4.	Revisão Conceitual	18
4.1	Rejeitos	18
4.2	Caracterização dos rejeitos	21
4.2.1	Propriedades Físicas	21
4.2.2	Classificação geoquímica	24
4.3	Métodos de disposição	26
4.3.1	Disposição convencional	27
4.3.2	Empilhamento drenado	30
4.3.3	Disposição subaérea	31
4.3.4	Disposição de rejeitos espessados - lama espessada, pasta e torta	32
4.4	Empilhamento de rejeitos filtrados	38
4.4.1	Filtragem.....	39
4.4.2	Influência do clima na aplicação método	44
4.4.3	Filtrabilidade.....	45
4.4.4	Transporte e disposição do rejeito filtrado	50
4.4.5	Aspectos econômicos do empilhamento de rejeito filtrado.....	52
5.	Exemplos de aplicação do método de disposição de rejeitos filtrados.....	58
5.1	Mina Pau Branco	60
5.2	Mina Casa de Pedra	65
5.3	Projeto Aripuanã	72
5.4	Mina Escobal (Guatemala)	79
5.5	Nexa Resources – Unidade Vazante	90
6.	Discussão	104
7.	Conclusão e Sugestões para trabalhos futuros.....	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1. INTRODUÇÃO

A disposição de rejeitos atualmente é um dos maiores desafios relacionados à mineração. Após as rupturas das barragens das minas Germano e Córrego do Feijão esse problema se tornou ainda mais evidente, principalmente para a parcela da sociedade desacostumada com os assuntos em torno da mineração. Se a atividade mineira já vinha sendo bastante questionada no período que sucedeu a ruptura da Barragem de Fundão, após o desastre no município de Brumadinho, a imagem, já desgastada, da mineração tornou-se ainda pior aos olhos da sociedade civil. As críticas e cobranças ao setor tornaram-se mais constantes e evidentes, apesar de que nem sempre tenham sido acompanhados de embasamento técnico e dados concretos. Todavia, não se pode criticar a sociedade civil por cumprir o seu papel de cobrar de autoridades e do setor mineral para que estes se esforcem na promoção do desenvolvimento sustentável, por meio de técnicas mais seguras e menos danosas. Cabe ao setor mineral, aos centros de pesquisa e universidades estudar as técnicas existentes e pesquisar novas possibilidades, em resposta aos anseios da sociedade e mesmo como compromisso inerente às suas atividades.

Após a ruptura da Barragem de Córrego do Feijão, a cada dia ficam evidenciadas informações e notícias que indicam mudanças na maneira de lidar com os rejeitos (sobretudo os de mineração), seja por iniciativa das próprias empresas, seja por iniciativa de órgãos reguladores, a partir da imposição de novas regras e nova legislação. Toda essa atual movimentação leva a crer que mudanças profundas no manejo de rejeitos de mineração, sobretudo no Brasil, estão por vir. A preocupação com relação a esse assunto, que já era grande, se tornou ainda maior. As ocorrências citadas fizeram com que fosse disparado o gatilho de uma inevitável mudança de postura. Dentro desse contexto, considerando a atual movimentação do setor mineral em busca de técnicas alternativas de disposição de rejeito, o trabalho aqui proposto procura realizar um estudo a respeito do método de disposição de rejeito filtrado (*dry stacking*), e apresentar exemplos de locais onde esse método já vem sendo utilizado ou projetado. Dentro desses exemplos procura-se descrever a maneira como determinados empreendimentos vêm realizando esse método, verificar particularidades observadas na execução do mesmo e, em alguns casos, levantar comparações de custos entre as possibilidades. São examinadas características e práticas que podem ser vantajosas para aplicação da técnica e podem, ainda, auxiliar os engenheiros na tomada de decisões relacionadas ao empilhamento de rejeitos filtrados.

2. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho são: fazer um estudo em torno do método de empilhamento de rejeitos filtrados, reunindo informações que evidenciem a evolução e expansão dessa técnica ao longo dos anos e apresentar alguns exemplos práticos de disposição de rejeitos a partir dessa técnica. Tem-se o intuito de verificar e descrever as operações realizadas, as limitações encontradas e os desafios impostos pela aplicação desse método de disposição de rejeitos em diferentes empreendimentos mineiros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito do assunto de disposição de rejeitos com foco no método de disposição de rejeitos filtrados, reunindo informações fundamentais ao entendimento dessa técnica.

Em seguida foram realizadas visitas técnicas em empreendimentos mineiros que aplicam o método de empilhamento de rejeitos filtrados, verificando-se como vêm ocorrendo as operações, bem como peculiaridades e desafios encontrados para a disposição final do rejeito. Foram visitadas as seguintes minerações: Mina Pau Branco (Vallourec), Mina Casa de Pedra (CSN) e Unidade Vazante (Nexa Resources). Após as visitas nesses locais, foram compartilhados informações e documentos entre o pesquisador e os responsáveis técnicos de cada mina, de maneira a garantir a validade e precisão das informações apresentadas neste trabalho. As informações apresentadas a respeito dos outros exemplos de aplicação da técnica estudada (nomeadamente: Projeto Aripuanã e Mina Escobal) são fruto de pesquisas em documentos e relatórios de domínio público. Verifica-se, então, neste trabalho a maneira como os empreendimentos citados e seus respectivos corpos técnicos vêm lidando com o rejeito gerado, apresentando-se aqui os principais pontos observados.

4. REVISÃO CONCEITUAL

Tem-se como objetivo apresentar nesta seção uma revisão dos principais conceitos e das técnicas que são abordadas neste trabalho. Ainda há poucas minas trabalhando com a opção de filtragem de rejeitos antes de sua disposição, fazendo com o que o domínio da técnica ainda não esteja completo, o que justifica e motiva esse estudo.

4.1 Rejeitos

A Lei Federal nº 12.305/2010 – 02/08/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define rejeitos como sendo: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”. Esse tipo de resíduo é presença constante na maior parte dos empreendimentos mineiros e representa um volume, geralmente, grande de material gerado, movimentado e reservado.

A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa, em geral, exige grandes áreas para efetuar a disposição e apresenta grande impacto ambiental e, por isso, as empresas têm maiores dificuldades para a realização de novos licenciamentos. A proximidade de áreas urbanas e a pressão pública têm despertado a necessidade de se buscarem alternativas a essa metodologia (GUIMARÃES et al., 2012).

Como os processos de beneficiamento de minérios, geralmente, acontecem com o material sólido misturado a uma quantidade maior de água, os rejeitos se apresentam ao final do processo na planta, quase sempre, na forma de polpa. Devido à grande quantidade de água presente nessa polpa, os rejeitos de mineração tendem a apresentar grande mobilidade associada à pequena (ou inexistente) resistência ao cisalhamento. Existe, portanto, a necessidade de conter ou dispor esse material de uma maneira que ofereça as condições necessárias de segurança, economicidade e respeito às normas e às leis. Isso acontece, geralmente, utilizando-se estruturas de contenção, popularmente chamadas de barragens, para reservar essa mistura de sólidos e água. Galvão-Sobrinho (2014) afirma que o fato de a produção mineral vir se elevando a magnitudes cada vez maiores resulta na geração de grandes volumes de resíduos (estéreis e rejeitos), implicando, conseqüentemente, um aumento significativo do porte das pilhas e barragens necessárias para o armazenamento desses

resíduos. Além disso, segundo Guimarães et al. (2012), a exploração crescente de jazidas com teor metálico cada vez menor também acentua essa tendência.

A história vem mostrando que essa maneira de dispor e reservar os rejeitos tem um considerável risco associado, como comprovam as rupturas e acidentes ocorridos com essas estruturas até hoje. A sociedade vem cobrando das empresas de mineração não só a certificação da segurança das barragens existentes como também a realização da disposição de rejeitos segundo outras técnicas que garantam uma maior segurança associada ao depósito final. Segundo Nunes (2014), fatores técnicos e de segurança devem ser analisados com o mesmo rigor do aspecto econômico. Caso isso não ocorra, além de os custos se tornarem muito altos, a segurança da operação de disposição de resíduos pode ser comprometida, alerta o mesmo autor.

Carneiro e Fourie (2018) afirmam que a seleção do método de disposição de rejeito com melhor custo-benefício para um empreendimento requer que todos os custos (ambientais, sociais, econômicos e associados ao risco) sejam devidamente contabilizados. Dentro desse contexto, os métodos de disposição de rejeito a partir de técnicas de desaguamento vêm sendo aplicados em um número cada vez maior de empreendimentos ao redor do mundo.

Em substituição ao método convencional, os rejeitos de mineração podem ser desaguados até as seguintes formas de disposição: espessado, pasta e filtrado. O estado e a consequente categoria do rejeito desaguado são, em geral, baseados no teor de sólidos (massa de sólidos em relação à massa total) e na tensão de escoamento. Dessa forma, diferentes tipos de rejeitos exigem diferentes tipos de depósitos para disposição. A Figura 4.1 traz um resumo das técnicas apresentadas neste trabalho, considerando esses fatores.

Duarte (2008) afirma que a seleção do método de disposição apropriado a um empreendimento mineiro depende: da natureza de beneficiamento, das condições geológicas e topográficas do local, das propriedades mecânicas dos materiais e do potencial de impacto ambiental dos rejeitos.

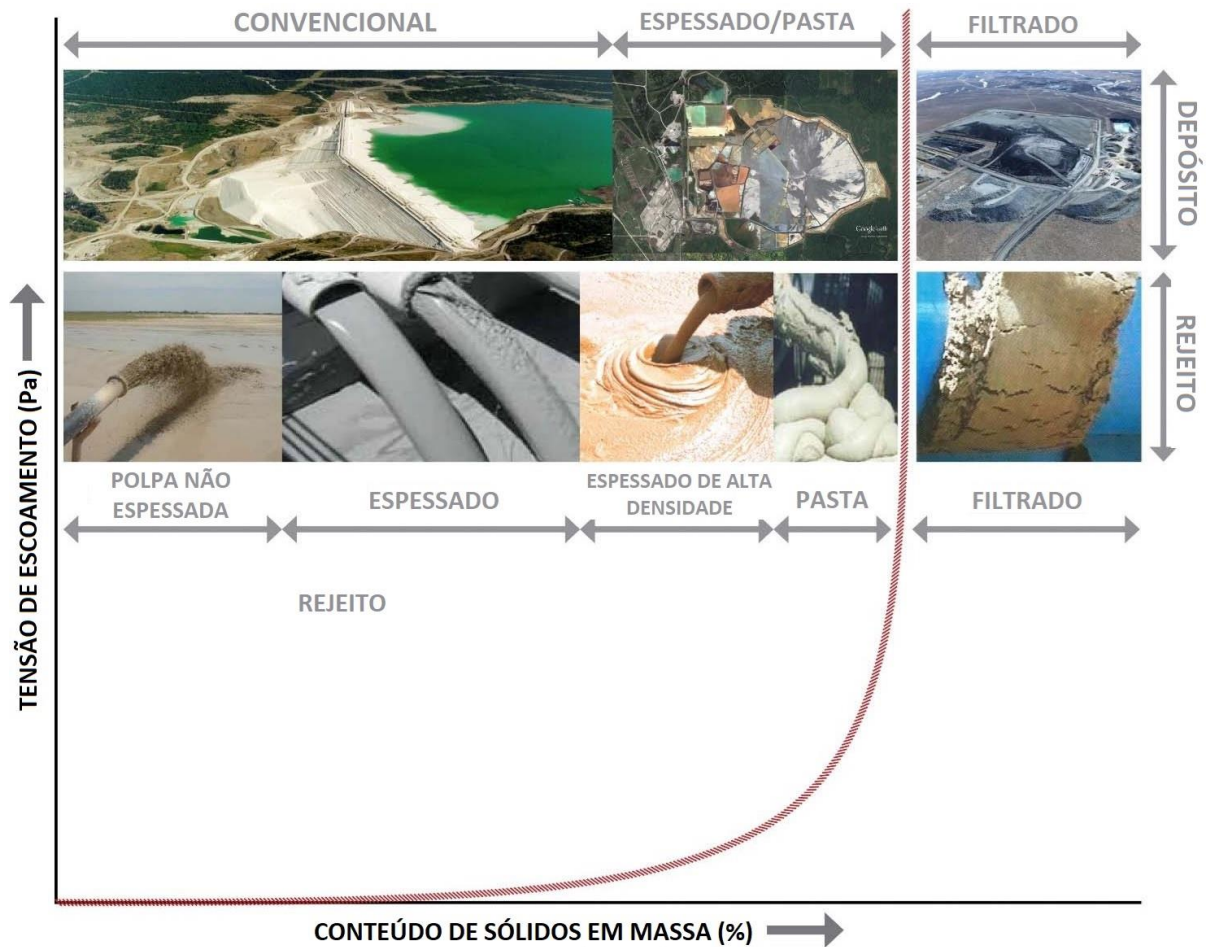


Figura 4.1 – Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito (MEND, 2017)

Outras estratégias de gestão do rejeito que não requerem a construção de barragens, como disposição em cava e a utilização do rejeito para preencher galerias de minas subterrâneas (*backfill*) também podem ser estratégias efetivas e devem ser consideradas com suas vantagens e desafios. Segundo Osorio (2005), além de diminuir a área ocupada pelo depósito de rejeito (*footprint*), a utilização de rejeito como *backfill* pode permitir que maiores valores de recuperação possam ser alcançados na lavra subterrânea.

Outra prática, estudada por Bosch (1987), Gomes (2009), Ferrante (2014) e Oliveira-Filho (2016), e que tende a se tornar cada vez mais frequente, é o reaproveitamento (lavra e beneficiamento) de rejeitos. Isso porque parte do material que, há anos, era considerado rejeito, nos dias atuais (ou no futuro), pode apresentar viabilidade para ser utilizado na alimentação das plantas de beneficiamento. O mesmo podendo acontecer com o material estéril. Dessa forma, considerando-se o avanço tecnológico e a redução do teor de corte ao longo dos anos, os rejeitos (e estéril) podem ser novamente aproveitados para a geração de produtos, como aponta Ferrante (2014). Segundo a mesma autora, essa prática ainda apresenta

vantagens relacionadas à redução do passivo do depósito de rejeitos e à melhoria nos índices de sustentabilidade ambiental.

Outros destinos possíveis dos rejeitos têm sido estudados, como a utilização na construção civil, a partir da transformação desses em tijolos, telhas e outros materiais. Contudo, ainda existe o desafio de se encontrar maneiras de utilização que apresentem viabilidade para aplicação em escala industrial. Nesse sentido, In the Mine (2019) aponta que as empresas AngloGold, CBA, Imerys e Nexa estão avaliando, desenvolvendo ou testando a utilização dos rejeitos como insumo na fabricação de cimento ou na fertilização de solos. Ainda segundo a publicação, a AngloGold já utilizou com sucesso o rejeito em obras civis internas da empresa a partir da utilização do mesmo na produção do agregado Flotabase. Outro exemplo apontado é a utilização de resíduos sólidos da produção de alumina na fabricação de pozolana, um insumo para a produção de cimento. A publicação relata a existência de outros projetos e testes sendo desenvolvidos em conjunto com *startups*, como o emprego de rejeitos como insumos para processos da indústria de óleo e gás e na fabricação de granitos sintéticos.

4.2 Caracterização dos rejeitos

Araujo (2006) afirma que, dependendo do tipo de minério e do processo de beneficiamento, os rejeitos podem variar desde materiais arenosos não plásticos, até materiais de granulometria fina e alta plasticidade. De maneira a selecionar as tecnologias mais apropriadas para o desaguamento de rejeitos, é necessário o conhecimento das propriedades físicas e geoquímicas desse material. Pode-se considerar que as propriedades físicas mais relevantes dentro desse tema são: distribuição granulométrica, presença de argilas, massa específica, reologia, plasticidade, consolidação e condutividade hidráulica. Dentre as propriedades geoquímicas destacam-se: mineralogia, potencial de geração de ácido, potencial de neutralização e potencial de lixiviação de metais. Também é necessário considerar os efeitos dos reagentes utilizados durante o processamento.

4.2.1 Propriedades Físicas

Segundo MEND (2017), as propriedades físicas dos rejeitos influenciam a eficiência e a viabilidade técnica dos métodos de desaguamento. As propriedades físicas podem variar de acordo com diferentes fatores, destacando-se as características do minério, a qualidade do

mesmo e as operações de processamento realizadas. No que se refere à classificação granulométrica, o rejeito pode ser classificado como aponta a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classificação granulométrica (MEND, 2017)

Classe de rejeito	Símbolo	Descrição	Exemplos ²
Rejeitos granulares (<i>Coarse tailings</i>)	CT	Areia siltosa, não plástica	Sal, areias minerais, rejeito grosseiro de carvão mineral, material arenoso de minério de ferro
Rejeitos de rocha dura (<i>Hard rock tailings</i>)	HRT	Silte arenoso	Cobre, sulfeto, níquel, ouro
Rejeitos de rochas alteradas (<i>Altered rock tailings</i>)	ART	Silte arenoso, vestígio de partículas de argila	Cobre pórfiro com alteração hidrotermal, rocha oxidada
Rejeitos finos (<i>Fine tailings</i>)	FT	Silte, com vestígio de partículas de argila	Rejeitos finos de carvão, resíduo de bauxita (lama vermelha)
Rejeitos ultrafinos (<i>Ultra fine tailings</i>)	UFT	Argila siltosa, alta plasticidade, densidade e condutividade hidráulica muito baixas	Areia betuminosa (<i>mature fine tailings</i> -MFT) ¹ , finos de fosfato, alguns finos de kimberlito e de carvão

Notas:

1. Os rejeitos de areias betuminosas são um produto do uso de água quente para extrair betume da areia. A polpa de rejeito é então bombeada e armazenada em barragens de rejeitos. A fração de rejeitos finos (MFT - *mature fine tailings*) acumula-se mais perto do centro da lagoa. Após vários anos, o MFT, consistindo em 86% de água, poderá sedimentar até cerca de 30% a 35% de teor de sólidos.

2. Os exemplos listados não são numerosos. Alguns tipos de minério produzirão múltiplas faixas de rejeitos que se encaixam em várias classes, por exemplo, os depósitos de cobre pórfiro podem ter um fluxo de rejeitos grosseiro e /ou um fluxo de rejeitos de rocha alterada.

MEND (2017) também afirma que a distribuição granulométrica de um rejeito será influenciada pela mineralogia do minério, pelo grau de cominuição no processo e porcentagem de fração argilosa. Segundo Portes (2013) quando os rejeitos possuem granulometria fina (abaixo de 0,074 mm) são denominados lama e quando possuem granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares. Guimarães (2011) apresenta em seu estudo o gráfico da Figura 4.2 que ilustra as faixas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos (lamas, rejeito de flotação e rejeito da concentração magnética) presentes em algumas minas do Quadrilátero Ferrífero.

Boccamino (2017) aponta que os rejeitos gerados nas minerações do Quadrilátero Ferrífero se dividem tipicamente em dois conjuntos: os rejeitos arenosos, derivados do processo de flotação, e os rejeitos finos, derivados do processo de deslamagem.

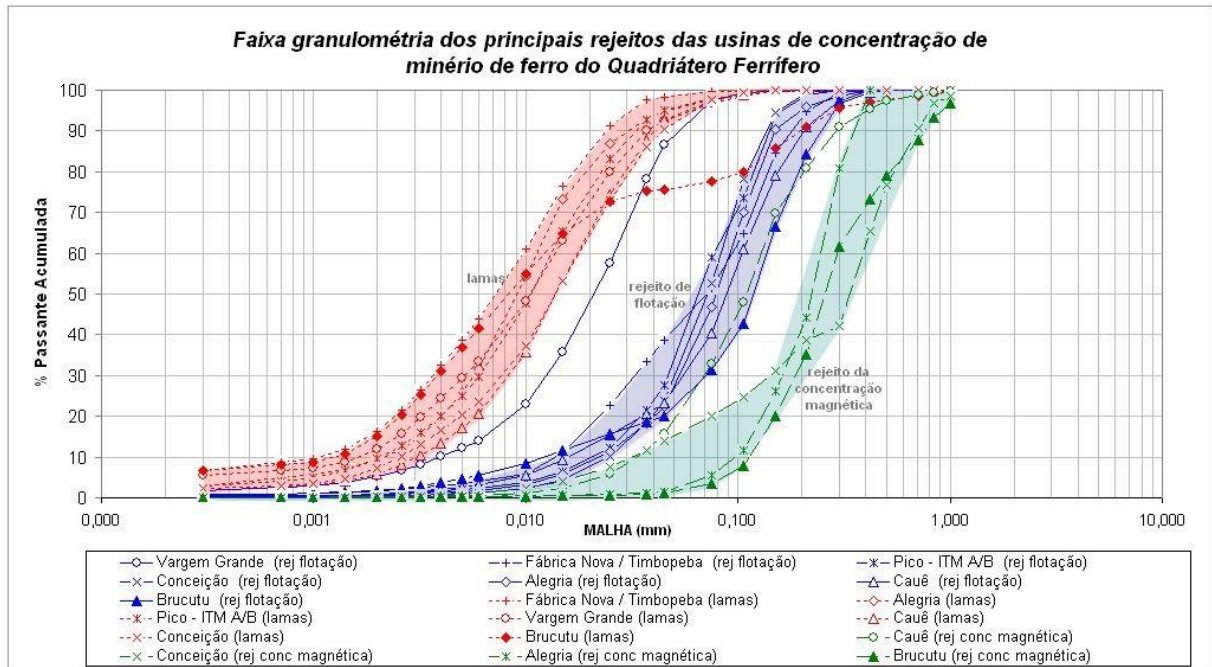


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero (Guimarães, 2011)

A Figura 4.3 apresenta cada uma das classes apresentadas na Tabela 4.1 dispostas num gráfico de distribuição granulométrica, facilitando a identificação de cada classe.

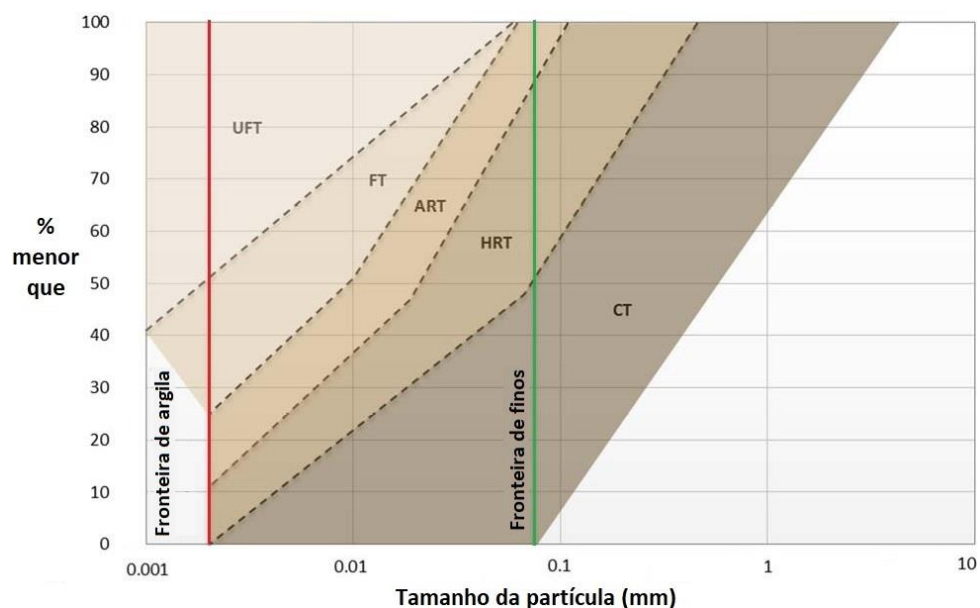


Figura 4.3 – Classificação de rejeito baseada na distribuição granulométrica (MEND, 2017)

4.2.2 Classificação geoquímica

Segundo MEND (2017) as propriedades geoquímicas dos rejeitos e da água presente nos poros influenciam os requisitos necessários para a gestão e tratamento da água dos depósitos. Essas propriedades são influenciadas pelos seguintes fatores:

- Composição do minério, que, por sua vez, depende da geologia, tipo do depósito e localização;
- Metodologia e condições do processo, incluindo cominuição, reagentes de processamento e produtos químicos;
- Processamento, tratamento e alterações físico-químicas adicionais após planta de beneficiamento;
- Método de disposição de rejeitos, incluindo tamanho de partícula e segregação mineral;
- Composição física e geoquímica dos rejeitos inicialmente depositados e drenagem associada, que dependem de todos os itens acima, especialmente minerais liberados durante o processamento;
- Mudanças físicas e geoquímicas nos rejeitos e drenagem associada ao longo do tempo, que dependem da composição inicial, mitigação subsequente e condições físicas e biogeoquímicas no local de armazenamento.

Algumas das principais considerações a serem feitas para a classificação geoquímica de rejeitos são, para MEND (2017):

- tipos e concentração de sulfetos e outros minerais primários e secundários, com potencial de contaminação da água (acima dos limites regulamentares);
- tipos e concentração relativa de minerais geradores e neutralizantes de ácidos que determinam o potencial de drenagem ácida e a maior solubilidade do metal;
- reagentes de processamento (por exemplo, cianeto) e alterações (por exemplo, calcário);
- mudanças potenciais nas propriedades físicas e biogeoquímicas do rejeito a partir de interações sólido-água-atmosférica-biológica (por exemplo, o desenvolvimento de camadas duras, dissolução de minerais, etc.).

A Tabela 4.2 traz uma classificação geoquímica generalizada de rejeitos, contendo também alguns exemplos de minas que apresentam os respectivos tipos de rejeitos descritos.

Tabela 4.2 – Classificação geoquímica de rejeitos (MEND, 2017)

Tipo de rejeito ¹		Descrição	Exemplos ²
Lixiviação metálica e drenagem ácida sulfúrica	Ácido	Os rejeitos já são ácidos e produzem drenagem ácida e elevada lixiviação de metais.	Copper Cliff Central Tailings, Kidd Creek Mine (cobre-zinco)
	Potencialmente Ácido	Os rejeitos contêm sulfetos, são potencialmente ácidos e prevê-se que gerem drenagem ácida e lixiviação de metais caso sejam expostos a condições meteorológicas aeróbicas. Esta classificação também se aplica aos casos em que o início da lixiviação é incerto.	Kemess South Mine (ouro-cobre); Canadian Malartic Mine (ouro); Suncor (areia betuminosa); Green’s Creek Mine (polimetálica)
Lixiviação metálica sulfúrica	Quase neutro ou pH básico com alta lixiviação metálica	Os rejeitos contêm sulfetos, mas prevê-se que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico (acontece neutralização suficiente). Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica, por reações de oxidação, em níveis acima dos limites regulatórios.	Snap Lake Mine (diamantes)
Lixiviação não sulfúrica		Os rejeitos contêm pouco ou nenhum sulfeto e existe a previsão de que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico. Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica a partir da dissolução mineral em nível acima dos limites regulatórios.	Colonsay Mine (potássio)
Baixa reatividade		Os rejeitos não produzem ou não existe a previsão de que produzam drenagem ácida ou lixiviação de metais em nível acima dos limites regulatórios.	

Notas:

1. Os tipos de rejeitos foram simplificados para classificar os rejeitos com base em estratégias de gerenciamento e possíveis resultados da qualidade da água.
2. Os exemplos listados são indicativos e não representativos da quantidade existente de cada tipo.

4.3 Métodos de disposição

O material que forma o rejeito geralmente não possui valor comercial (ou a tecnologia disponível não permite uma maior recuperação desse material). Dessa forma se faz necessário encontrar uma maneira e um local para dispor esse volume. O método mais comum para realizar essa disposição (chamado de método convencional) acontece a partir da criação de reservatórios em superfície que consistem em diques ou barragens de contenção onde o rejeito é descartado na forma de polpa.

Além do chamado método convencional de disposição, existem os seguintes métodos, chamados de métodos alternativos: empilhamento drenado (para rejeito arenoso), lama espessada, pasta, disposição subaérea e disposição de rejeitos filtrados (*dry stacking*) (os quatro últimos para rejeitos finos). Outro método que pode ser chamado de alternativo é o método da codisposição, no qual os rejeitos são colocados no mesmo depósito do material estéril proveniente da mina.

O descarte mais comumente utilizado até os dias de hoje acontece na forma de polpa (mistura de água e sólidos), sendo essa transportada por meio de tubulações com a utilização de sistemas de bombeamento ou por gravidade. Todavia, caso o rejeito apresente uma alta concentração de sólidos, pode ser recomendável a utilização de correias transportadoras ou caminhões. A Figura 4.4 traz um esquema relacionando características de alguns dos aspectos nos quais os rejeitos podem ser encontrados nos empreendimentos mineiros.

Segundo Gomes (2004) citado por Peixoto (2012), dentro desse contexto de teor de sólidos e consistência, os rejeitos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Rejeito em polpa (*slurry*): rejeito contendo baixo teor de sólidos e que apresente baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento;
- Rejeito espessado (*thickened tailings*): rejeito parcialmente desaguado e que apresenta consistência semelhante a polpa, sendo possível o transporte por bombeamento;
- Rejeito em pasta (*paste tailings*): rejeito espessado que apresenta consistência de pasta e que não flui naturalmente e não drena grande quantidade de água quando disposto no depósito final;

- Rejeito filtrado úmido (*wet cake tailings*): rejeito com aspecto de uma massa saturada ou quase-saturada não bombeável;
- Rejeitos filtrados secos (*dry cake tailings*): rejeito com aspecto de uma massa não-saturada não bombeável, contendo grau de saturação geralmente entre 70% e 85%.

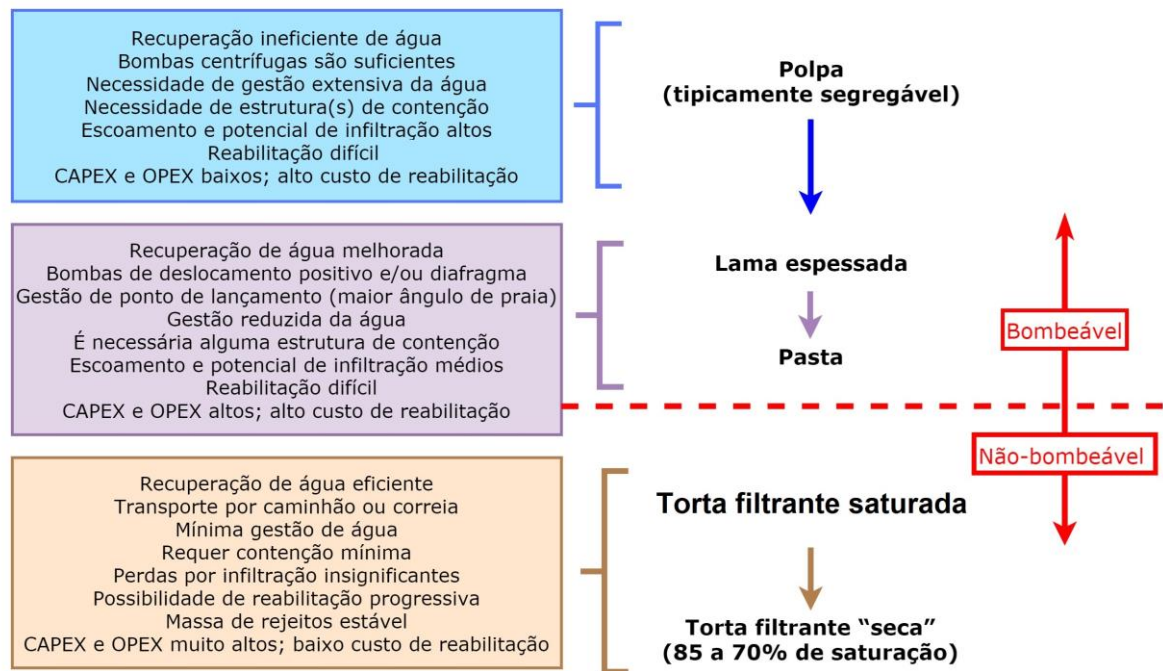


Figura 4.4 – Esquema comparativo entre formas de disposição de rejeito (Adaptado de Australia's Department of Industry, Innovation And Science, 2016)

As características de cada método são discutidas a seguir.

4.3.1 Disposição convencional

Até os dias atuais, o método de disposição de rejeito mais utilizado é aquele que concilia a disposição do rejeito na forma de polpa com a construção de estruturas de contenção chamadas de barragens de rejeito. Porquanto, esse método é chamado de convencional. Segundo Fernandes (2017), as barragens são obstáculos artificiais construídos com o propósito de reter água, rejeitos ou detritos para fins de armazenamento ou controle.

Dependendo do tipo e da finalidade dessas estruturas, elas podem ser construídas utilizando-se o próprio rejeito, juntamente com solos, material estéril e de empréstimo. No método convencional existe a necessidade de que a estrutura retenha (reserve) água. Todavia, as barragens de rejeito se diferenciam das barragens de contenção de água. Isso porque as

barragens de rejeito são construídas ao longo do tempo, visando, segundo Duarte (2008), a diluição dos custos no processo de extração mineral por meio de alteamentos sucessivos, enquanto a barragem para contenção exclusiva de água é construída de uma só vez, antes de desempenhar sua função principal.

Fernandez-Iglesias et al. (2013) apontam que a disposição convencional de rejeitos tem como desvantagens o grande volume necessário para a disposição dos rejeitos, a necessidade de construção de estruturas de contenção como diques e barragens e o baixo potencial de recuperação da área.

A construção de uma barragem de rejeito geralmente inicia com uma estrutura inicial chamada de dique de partida. Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), essa estrutura de partida normalmente é construída como um dique convencional de material de empréstimo, em geral de características drenantes (como se fora um dreno de pé). São considerados, geralmente, três métodos de alteamento para barragens de rejeito, são eles: montante, jusante e linha de centro. A nomenclatura desses métodos está relacionada com a direção tomada pela crista do barramento na medida em que os alteamentos se desenvolvem. Esses métodos de alteamento são mais bem explicados a seguir.

- **Alteamentos**

- a) Alteamento a montante

O método de alteamento a montante, ilustrado na Figura 4.5, limita-se, Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), a rejeitos com significativa fração de areia na faixa de 40-60%. Além disso, a praia formada por esses rejeitos deve se encontrar na condição drenada para que apresente competência suficiente para a construção e suporte do dique de alteamento. Os alteamentos acontecem para dentro do depósito, tendo o próprio material de rejeito como base de sustentação. É necessário um rigoroso controle do nível freático para manter o material próximo aos diques o mais drenado possível.



Figura 4.5 – Perfil de depósito com alteamento a montante (IBRAM, 2016)

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015) o alteamento de montante não é indicado para o armazenamento de água. O fenômeno da liquefação é uma preocupação constante. Não é indicado quando a velocidade (ou taxa) de alteamento seja alta ou em locais sujeitos a vibrações (provocadas por equipamentos, detonações ou sismos naturais), uma vez que podem se traduzir em gatilho para uma eventual liquefação. Ainda segundo os autores, os diques de alteamento não têm caráter estrutural. Ou seja, a estrutura de contenção compreende o prisma formado pela superposição de sucessivas praias de rejeitos ao longo do tempo.

b) Alteamento a jusante

No alteamento a jusante, ilustrado na Figura 4.6, corre a compactação do aterro sobre o talude de jusante anterior. Os alteamentos ocorrem para fora do depósito. É o método de alteamento que requer maior volume de material para sua construção. O avanço do pé do talude de jusante pode ocasionar interferências em outras estruturas da mina, caso não seja feito um planejamento adequado. Existe a necessidade de medidas de controle da erosão do talude de jusante. É uma boa opção quando existe a necessidade de armazenamento de água. Como existe a compactação do aterro, a estrutura é compatível com elevadas taxas de alteamento e apresenta maior resistência à liquefação.



Figura 4.6 – Perfil de depósito com alteamento a jusante (IBRAM, 2016)

c) Alteamento de linha de centro

No alteamento de linha de centro, ilustrado pela Figura 4.7, o método construtivo se dá de modo que as cristas dos sucessivos alteamentos estejam alinhadas verticalmente. É um método que conjuga técnicas construtivas dos dois métodos anteriores, dessa forma apresenta vantagens de ambos, ao mesmo tempo em que tenta minimizar suas desvantagens.

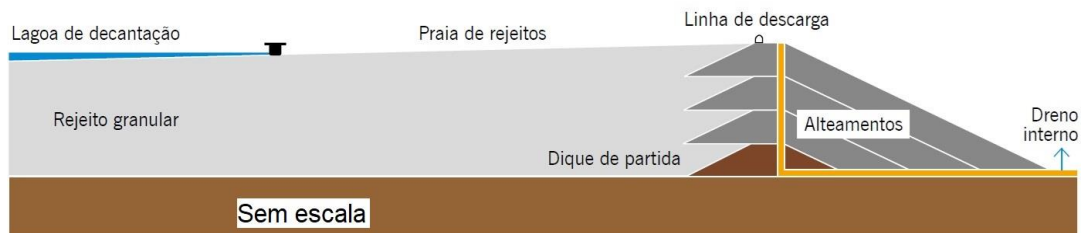


Figura 4.7 – Perfil de depósito com alteamento de linha de centro (IBRAM, 2016)

4.3.2 Empilhamento drenado

Uma primeira informação relevante a respeito do método de empilhamento drenado é o fato de ser adequado somente a rejeitos que apresentem coeficiente de permeabilidade tal que permita um fluxo de drenagem estritamente gravitacional e subvertical no interior do aterro. Portanto, esse método não é adequado a rejeitos finos, mas se torna bastante interessante no caso de rejeitos arenosos. (OLIVEIRA-FILHO, 2017)

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), nesse método os rejeitos arenosos são depositados sob a forma de pilha em locais de meia encosta, como mostra a Figura 4.8, ou em pequenos vales confinados (grotas) dotados de um sistema de drenagem interna, em geral, na fundação do reservatório. Esse sistema de drenagem de fundo é o que permite o padrão de fluxo gravitacional e subvertical no interior do reservatório, o que resulta em um depósito despressurizado no que se refere à poropressão.

Essa situação é bastante favorável em termos de estabilidade dos taludes do depósito. Algumas vezes é possível observar uma lagoa na superfície do depósito, todavia essa lagoa é resultado quase que exclusivamente da acumulação de água proveniente da polpa de rejeito, ou seja, a contribuição de água afluyente é pequena ou limitada à precipitação na área do reservatório. Sendo assim, quando cessadas as operações, a lagoa de rejeito, sem recarga, acaba por desaparecer. Outra característica relevante desse método é a possibilidade de

utilização do próprio rejeito na construção dos alteamentos, geralmente pelo método de montante. (OLIVEIRA-FILHO e ABRÃO, 2015).



Figura 4.8 – Exemplo de depósito de rejeito pelo método de empilhamento drenado. (IBRAM, 2016)

De acordo com Pimenta (2011) citado por Portes (2013), o método de empilhamento drenado tem como principais objetivos:

- Obter um maciço não saturado e estável;
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil;
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Obter maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicação segura do método de montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.

4.3.3 Disposição subaérea

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), os métodos de disposição subaérea, lama espessada, pasta e torta têm alguns pontos em comum.

- São técnicas alternativas para disposição de rejeitos finos;
- Consistem em ciclos alternados de lançamento e espera (não lançamento);
- Espera-se um aumento do teor de sólidos e consequente aumento de resistência do material por conta de dois fenômenos físicos de alta relevância para o sucesso desses métodos: o adensamento por peso próprio e o ressecamento por evaporação;

- A disposição do rejeito acontece em camadas pouco espessas.

Na disposição subaérea ocorre a disposição do rejeito fino (lama) em finas camadas, de forma que, durante o período de não lançamento, acontece o adensamento e ressecamento do material da camada lançada. Dessa forma, torna-se possível obter um menor volume e maior resistência devido ao adensamento e ao ressecamento do rejeito. Lima (2006) afirma que, dentre os métodos alternativos de disposição de rejeitos, o método de disposição subaérea é considerado o mais simples e de menor custo.

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015) e Lima (2006), a disposição subaérea pode ser descrita como uma técnica em que o rejeito é depositado em finas camadas, permitindo seu adensamento e drenagem antes do lançamento da camada seguinte, de modo a produzir um material mais densificado, com baixas poropressões e, eventualmente, até com sucção. Importante enfatizar que, nesse método, os rejeitos finos são dispostos sem sofrer qualquer tipo de modificação na planta. Os benefícios dessa técnica estão relacionados não só à maior densificação do material, como também ao aumento significativo de sua resistência. Devido à alternância entre lançamento e espera é necessário contar com diferentes reservatórios (ou baias) em número e área suficientes para que a disposição ocorra em um deles enquanto a drenagem e secagem tenham condições de acontecer nos demais.

Lima (2006) demonstra que cada nova camada adicionada ao depósito reativa o processo de adensamento das camadas anteriormente depositadas, provocando recalques adicionais cada vez maiores, porém segundo uma taxa menor, devido ao enrijecimento das camadas inferiores à medida que o carregamento vai aumentando. A mesma autora também observa que o início do ressecamento se dá de forma cada vez mais tardia, e isso precisaria ser levado em conta no tempo de espera, que deverá ser progressivamente mais longo para a máxima eficiência do método.

4.3.4 Disposição de rejeitos espessados - lama espessada, pasta e torta

Lama espessada, pasta e torta são três técnicas alternativas para disposição de rejeito fino que utilizam uma ou mais fases de espessamento precedendo o descarte intermitente de camadas finas no local de deposição. O conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky em 1968 e consiste no aumento da concentração de sólidos, por meio do desaguamento da polpa e consequente aumento do teor de sólidos (PORTES, 2013).

Segundo Peixoto (2012), o aumento no teor de sólidos tem como consequência o aumento da resistência à capacidade de escoamento do depósito de rejeito. Konrad (1997) citado por Lima (2006) afirma que a maior consistência apresentada pelo rejeito, além de contribuir com o aumento da capacidade de armazenamento do reservatório, permite que não seja necessário aguardar longos períodos para que a área de disposição possa ser reabilitada.

Apesar de o espessamento ser uma operação que já acontece para obtenção da polpa da disposição convencional e também no método de disposição subaérea, nas três técnicas abordadas nesse subitem o nível de teor de sólidos que se atinge é maior o suficiente para que se obtenha um produto que não segregue na disposição. Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), essa característica do rejeito espessado de não segregar está associada a certa resistência ao cisalhamento e leva à formação de depósitos com alguma angulosidade. Ainda segundo os autores, é possível dizer que quanto maior o teor de sólidos do rejeito espessado, maior também será sua resistência ao cisalhamento.

O limite para a denominação de cada um dos três métodos de rejeito espessado está relacionado a esses níveis de resistência e às características do bombeamento desse material. Para alguns autores, o rejeito espessado com tensão de escoamento abaixo de 200 Pa é chamado de lama espessada. Acima de 200 Pa o produto recebe o nome de pasta (Jewel e Fourie, 2002 apud Oliveira-Filho e Abrão, 2015). O limite superior para a denominação “pasta” seria o limite operacional das bombas de deslocamento positivo. Qualquer produto acima desse limite é chamado de torta. (OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2015).

Segundo Portes (2013), de modo a auxiliar o processo de sedimentação, os reagentes mais utilizados no processo de espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes. Floculantes são polímeros naturais ou sintéticos contendo alto peso molecular que auxiliam na sedimentação de partículas suspensas. O mesmo autor afirma que coagulantes são minerais naturais, tais como cal e sais férricos, que são eficazes para suspensões coloidais, porém possuem menor eficiência se comparados aos floculantes. Ainda segundo o mesmo autor, dentro desse contexto, o pH é outro fator que afeta o estado de agregação e dispersão das polpas.

Fitton (2013) afirma que os espessadores, além de serem amplamente utilizados, são os equipamentos mais comuns para realizar o desaguamento e a recuperação da água dos rejeitos na indústria mineral. Para isso, podem ser utilizados desde o espessador convencional

até o *deep cone*, dependendo do nível de desaguamento e de consistência do rejeito que se pretenda atingir. A Figura 4.9 apresenta os principais tipos de espessadores utilizados pela indústria mineral e características de cada um deles.

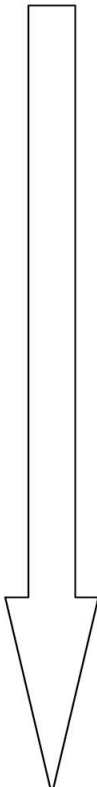








Tempo	Tipo	Forma	Características
	Convencional 		Ação ineficiente do floculante, Grande área, Ø até 150 m, Obtém baixa densidade.
	High Rate ou High Capacity 		Adição de floculante, Menor área se comparado ao Convencional, Obtém densidade similar ao Convencional.
	High Density 		Menor área e maior altura que o <i>High Capacity</i> , Obtém máxima densidade.
	Deep Cone 		Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i> , Maior redução de área, Produção de pasta.

Figura 4.9 - Tipos de espessadores geralmente utilizados para o espessamento de rejeitos de minério de ferro (Portes, 2013)

Segundo Oliveira et. al (2004) em um espessador contínuo, o *underflow* e o *overflow* descarregam continuamente e a polpa é alimentada pelo duto de alimentação. No interior do espessador as partículas presentes na polpa iniciam movimento descendente e a água ascendente. Ainda segundo os autores, durante o espessamento as partículas têm seu movimento modificado pelas forças da gravidade, empuxo e pela força de atrito entre líquido

e partículas. Os mesmos autores afirmam que a adição de flocculantes favorece a formação de agregados, reduzindo a superfície específica total das partículas, possibilitando um aumento na taxa de sedimentação.

Portes (2013) afirma que o funcionamento de um espessador convencional se dá a partir da alimentação da polpa na parte superior central do equipamento, seguida pela sedimentação e adensamento incompleto das partículas. A água (*overflow*) é coletada na parte superior do tanque, enquanto as partículas sedimentadas (*underflow*) são direcionadas até o cone de descarga a partir da rotação de pás em torno de um eixo central. A Figura 4.10 mostra uma seção típica de espessador.

O espessador pode ser dividido em três zonas características. Segundo Oliveira et. al (2004) na zona de clarificação as partículas estão distantes umas das outras, predominando uma maior diluição da polpa. Na zona de sedimentação, além do aumento na tendência de formação de agregados, também acontece o aumento da concentração de partículas na polpa. Já na zona de compressão os sólidos são espessados ou compactados, aumentando assim a densidade da polpa.

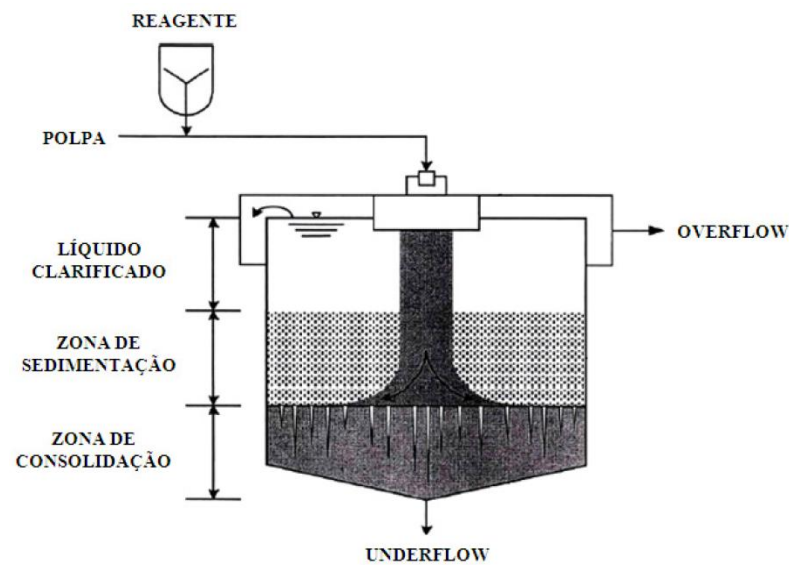


Figura 4.10– Seção típica de um espessador (Portes, 2013)

Segundo Oliveira Filho e Abrão (2015), no método de lama espessada, dependendo do teor de sólidos atingido, o transporte pode ser feito por bombas centrífugas ou por bombas de deslocamento positivo e inclinações (ângulo de repouso) na faixa de 1 a 3,5% podem ser alcançadas após a disposição. Durante a disposição da lama espessada, um pouco de água pode ser liberado por adensamento e a mesma deve ser coletada numa lagoa de contenção.

Ainda segundo os mesmos autores, caso o rejeito esteja na forma de pasta, o transporte é realizado, em geral, utilizando-se bombas de deslocamento positivo e a partir da descarga podem ser alcançados ângulos de praia entre 2 e 10%. Praticamente não ocorre nenhuma drenagem do material por adensamento. O rejeito, tanto na forma de pasta quanto na forma de lama espessada, sendo disposto de maneira intermitente em finas camadas pode ter como consequência o ressecamento, em situações climáticas favoráveis, o que induz a formação de trincas na superfície do material disposto. O fluxo de deposição de uma nova camada sobre camadas já ressecadas leva a um preenchimento dessas trincas, formando uma estrutura mais estável. O rejeito na forma de torta apresenta maior resistência ao cisalhamento e por isso é, geralmente, transportado por meio de caminhões ou via correia transportadora.

Um dos aspectos mais significativos dos métodos de espessamento é a maior taxa de recuperação de água. Essa característica se torna ainda mais atrativa na medida em que o uso sustentável da água se torna uma demanda cada vez mais constante nos empreendimentos mineiros. Além disso, esses métodos requerem estruturas de contenção menos robustas que na disposição convencional, isso devido à elevação dos valores de resistência ao cisalhamento a partir do espessamento. Pode-se destacar também que a menor quantidade de água e os maiores ângulos de praia alcançados nesses métodos proporcionam maior segurança ao depósito final de rejeitos. A Figura 4.11 ilustra o tipo de rejeito, o equipamento de desagramento e a técnica de transporte praticada em cada método.

A empresa Ferbasa, na planta de recuperação de cromo da escória da fabricação de ligas de ferro-cromo-silício, em Campo Formoso (BA), utiliza espessadores verticais (Silva, 2020).

Consistência do rejeito		Tecnologia de desagamento		Transporte	
Polpa 30 a 58% de sólidos		Espessador convencional		Por gravidade a partir de calhas ou tubulação de baixa pressão. Com ou sem bombas centrífugas	
Lama espessada de alta porcentagem de sólidos (55 a 65%)		Espessador <i>High rate</i>		Bombas centrífugas ou de diafragma	
Pasta de baixa densidade 60 a 70% de sólidos		Espessadores <i>Deep bed</i> ou <i>Deep cone</i>		Bombas de pistão ou diafragma (alta pressão)	
Pasta de alta densidade 65 a 75% de sólidos		Espessador <i>Deep cone</i> ou filtro		Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão	
Torta filtrante > 80% de sólidos		Filtro		Caminhão ou correia	

Figura 4.11 – Tipos de rejeitos segundo a porcentagem de sólidos e respectivos modos de espessamento e transporte. (Adaptado de Golder Associates, 2015)

Segundo Teixeira (2018), em minerações subterrâneas, rejeitos na consistência de pasta de alta densidade apresentando porcentagem de sólidos na faixa entre 78% e 87%, adicionados, ou não, a cimento, podem ser utilizados como *pastefill*. Além disso, segundo o mesmo autor, rejeitos finos também podem ser utilizados em conjunto com fragmentos de rocha para formar o enchimento de galerias subterrâneas, a partir da técnica denominada

rockfill. Nesse caso, o transporte de suspensões poderá ser realizado a partir de tubulações e o transporte de material fragmentado a partir de passagens (ou chutes), como aponta Silva (2005).

Os filtros são equipamentos que, em geral, permitem um maior desaguamento, se comparados aos espessadores. A utilização de equipamentos como filtro a disco ou filtro prensa para o desaguamento de rejeitos pode permitir o reaproveitamento de cerca de 90% de água. Esse método, frequentemente referenciado como empilhamento a seco (*dry stacking*), é apontado como uma alternativa mais segura e sustentável, principalmente se comparada ao método convencional de disposição de rejeitos. Neste trabalho o método será referenciado como empilhamento de rejeitos filtrados ou disposição de rejeitos filtrados. Por ser o tema central do presente trabalho, esse método será mais bem descrito no próximo subitem.

4.4 Empilhamento de rejeitos filtrados

A filtragem de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos por meio da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido (PORTES, 2013). A Figura 4.12 traz uma foto da pilha de rejeito filtrado sendo construída na Mina Cerro Lindo, no Peru.



Figura 4.12 – Pilha de rejeito filtrado (*Dry stack*) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru (Adaptado de Golder Associates, 2015)

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), nessa técnica os rejeitos são espessados até certa consistência, por meio de espessadores e, em seguida, são filtrados utilizando-se filtros a vácuo ou de pressão positiva. A partir daí, a água proveniente das etapas de espessamento e filtração pode então ser reutilizada no processamento do minério. O teor de umidade do produto da filtração, chamado torta filtrante (*filter cake*), é um dos fatores mais importantes para o manejo posterior desse material (transporte, lançamento e eventual compactação).

4.4.1 Filtração

A filtração acontece a partir da aplicação de uma força sobre as partículas através de um meio poroso e pode ser conseguida por meio de: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Na filtração a vácuo, uma pressão negativa é aplicada abaixo do meio filtrante, enquanto, na filtração sob pressão, é aplicada uma pressão positiva na polpa, forçando-a a ir de encontro ao meio filtrante. Existem também processos de filtração que combinam vácuo e pressão (filtração hiperbárica) e outros que acontecem a partir da ação dos capilares de meios cerâmicos porosos combinados com a aplicação de vácuo (filtração capilar) (GUIMARÃES, 2011).

A Tabela 4.3 traz um resumo dos principais mecanismos de filtração utilizados na indústria mineral. A escolha do equipamento filtrante depende em grande parte da economia do processo, mas as vantagens econômicas serão variáveis de acordo com os seguintes critérios (FOUST et al., 1982, citados por Azevedo e Cerqueira, 2017):

- viscosidade, densidade e reatividade química do fluido;
- dimensões da partícula sólida, distribuição granulométrica, forma da partícula, tendência à floculação e deformabilidade;
- concentração da suspensão de alimentação;
- quantidade do material que deve ser operado;
- valores absolutos e relativos dos produtos líquido e sólido;
- grau de separação que se deseja efetuar;
- custos relativos de mão-de-obra, de capital e de energia.

Tabela 4.3 – Mecanismos de filtração (Adaptado de Guimarães, 2011)

Tipos	Características	Modelos de Filtros
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, filtro de disco convencional, filtro horizontal de mesa, filtro horizontal de esteira
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, Filtro prensa vertical
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtração hiperbárica	A partir da combinação de vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec

A indústria mineral, em geral, utiliza diferentes tipos de filtros existentes, dentre eles destacam-se: filtro de disco, filtro de tambor, filtro de correia e filtro prensa. Cada um deles apresenta diferentes mecanismos de filtração, modos de operar, requisitos, taxas de filtração, e outras características específicas de cada um. Segundo Conexão Mineral (2019), qualquer que seja o filtro escolhido para a filtração de rejeito em um empreendimento, o uso do espessador é frequentemente recomendável, de maneira a reduzir o número de equipamentos e evitar mudanças bruscas nas características da polpa que alimenta o filtro. No presente trabalho são destacados o filtro prensa e o filtro de disco.

Legner (2017) afirma que os filtros tipo prensa são equipamentos amplamente utilizados no tratamento de águas e efluentes. Isso porque, segundo a autora, apresentam como vantagens: baixo custo de manutenção, menor consumo de energia, possibilidade de reaproveitamento do material retido e pelo fato de apresentar elevada concentração de área de filtração em pequeno espaço físico de instalação. Ainda segundo a autora, esse tipo de filtro é empregado quando se deseja aliar a busca por um maior teor de sólidos com um baixo consumo de energia elétrica.

Silva (2016b) discute critérios de projeto com dois arranjos de disposição de pilhas de resíduos de alumínio, com uso de filtro prensa na CBA e na Alunorte. O custo de mão de obra de operadores, montagem e desmontagem foi considerado elevado e a lavagem da torta se mostrou imperfeita e demorada. Boccamino (2017) mostra estudo realizado na Mina do Pico, verificando a possibilidade de filtração dos rejeitos arenosos provenientes da flotação e os

rejeitos finos com origem na deslamagem. Uma das soluções apresentadas pelo autor foi a disposição conjunta desses materiais com estéril (codisposição). Um sistema mais complexo, mas viável, segundo o mesmo autor.

O filtro prensa é formado por um conjunto de placas que, quando estão reunidas, formam câmaras entre as placas vizinhas. A superfície de cada placa é revestida com um tecido filtrante. As placas são agrupadas e prensadas a partir da ação de pistões, enquanto a polpa de rejeito é bombeada sob alta pressão para o interior das câmaras. A polpa é forçada a ir de encontro às placas, e assim, o fluido filtrado atravessa o tecido filtrante, indo em direção ao interior da moldura das placas, e flui por gravidade até orifícios (chamados de poros) na base de cada placa, sendo, em seguida, recolhido por canaletas. As partículas ficam retidas no tecido filtrante que envolve as molduras das placas, formando as tortas, que depois são descarregadas a partir da separação entre as placas. Dependendo do modelo do filtro prensa a descarga também pode ser auxiliada por sopro ou por sistema agitador das placas. A Figura 4.13 traz uma ilustração de um filtro prensa. Nos últimos anos, os fornecedores de filtro prensa têm investido em sistemas cada vez mais automatizados (“inteligentes”), visando maximizar o desempenho e a taxa de produção do equipamento.

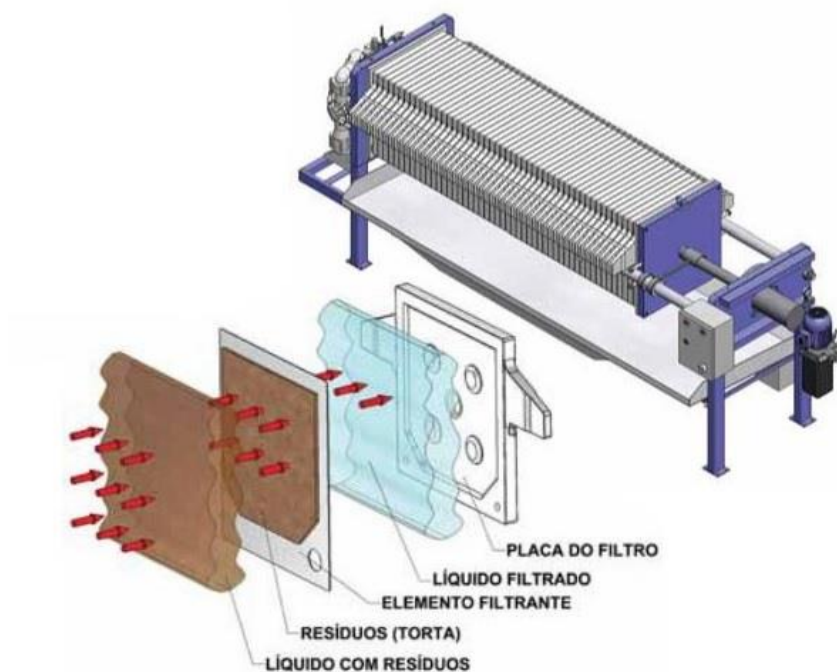


Figura 4.13 – Esquema simplificado de filtro prensa (Adaptado de Bomax, 2014)

Segundo Oliveira et al. (2004) o filtro de disco apresenta discos verticais com os centros ligados a um mesmo eixo, perpendicular aos planos dos discos. O meio filtrante envolve os dois lados dos discos. Os discos são imersos na polpa de rejeito a partir da rotação do eixo central, de modo que, enquanto um setor dos discos é imerso na polpa, a outra parte fica externa a esta. A polpa é mantida em suspensão pela ação de agitadores. As tortas filtrantes são formadas a partir da aspiração contínua no primeiro setor do disco (zona de formação). Na parte externa ao tanque a continuação da sucção retira mais umidade da torta e direciona o filtrado para o sistema de drenagem (zona de secagem). Em seguida, no setor seguinte dos discos, a torta é descarregada pela ação de um sopro de ar comprimido e com o auxílio de um objeto de raspagem do meio filtrante (zona de sopro). Em seguida o equipamento direciona a torta filtrante por meio de calhas para correias transportadoras instaladas abaixo do filtro. Alguns modelos ainda possuem um setor de sopragem submersa, para promover a limpeza do meio filtrante a partir da liberação de partículas que porventura venham a se prender no meio filtrante. A Figura 4.14 traz um esquema simplificado de um filtro de disco.

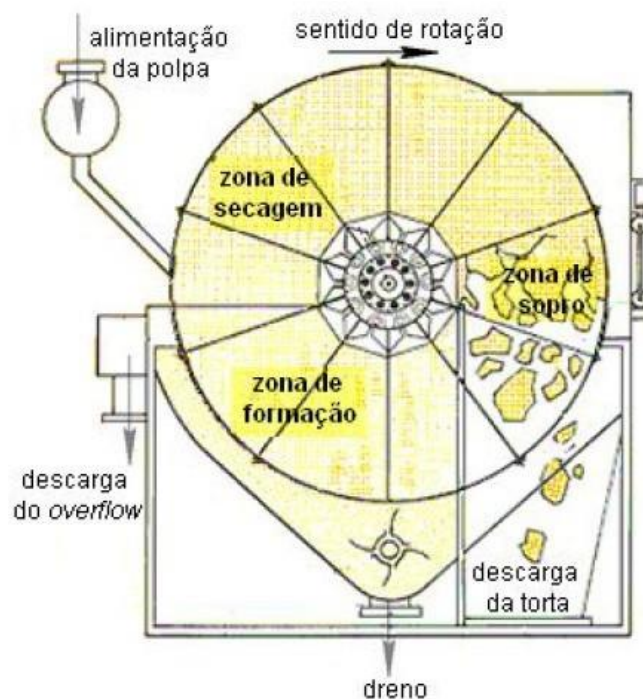


Figura 4.14 – Esquema de filtro de disco (Portes, 2013)

Davies (2011) afirma que no método de disposição de rejeito filtrado o material deixa a planta de filtragem com um teor de umidade pré-determinado que permita o transporte por caminhão ou correia, e que viabilize a posterior deposição e compactação do material para formar uma pilha densa e não-saturada, frequentemente conhecida como “*dry stack*” (pilha

seca, na tradução literal). Essa estrutura, em geral, será autoportante, não necessitando a construção de uma estrutura com a função de retenção do material da pilha. Porém, dependendo das características de umidade e plasticidade do depósito formado, pode sim ser necessária a construção de uma estrutura de contenção, ainda que, de pequeno porte.

Ainda segundo o autor, apesar de a pilha ser denominada “*dry stack*”, o rejeito filtrado, em geral, apresenta umidade pouco abaixo da condição saturada, não devendo ser nem muito úmido nem muito seco. O grau ótimo de saturação geralmente fica em torno de 60 e 80%. O teor de umidade deve ter valor suficiente para permitir a compactação e a integridade estrutural da pilha, além de proporcionar ganhos relacionados à gestão da água.

Guimarães et al. (2012) e Mining Magazine (2017) afirmam que um dos grandes benefícios da filtragem de rejeitos é a promoção do aumento de recuperação de água de processo da planta de beneficiamento, reduzindo, assim, o consumo de água nova. Guimarães et al. (2012) e Crystal et al. (2018) apontam que a filtragem de rejeitos é uma prática usual nas minerações localizadas em regiões de clima árido. A prática dessa técnica objetiva reduzir as perdas de água, devido à escassez desse elemento nessas regiões que também são marcadas pela alta evaporação, o que aumenta a possibilidade de que a pilha permaneça insaturada, favorecendo, assim, a estabilidade da mesma.

Oliveira-Filho e Abrão (2015) e Peixoto (2012) afirmam que o transporte do rejeito filtrado para a área de disposição acontece geralmente por meio de caminhões ou correias transportadoras, devido à (relativa) baixa umidade do material. Após o transporte e descarga no local de deposição, o material é então espalhado e compactado com o auxílio de equipamentos de terraplanagem, até se obter a qualidade e estabilidade pretendidas para a pilha. Esse método é considerado como sendo o mais versátil dentre os apresentados, devido à variedade de *layouts* dos depósitos de rejeito filtrado dependendo dos terrenos onde serão implantados: pilha, encosta e vale.

Davies (2011) apresenta uma lista de situações nas quais o método de disposição de rejeito filtrado é indicado, destacando-se: regiões de clima árido, onde a conservação e economia de água são essenciais; locais que apresentam alta atividade sísmica, onde o método convencional é contraindicado; regiões de clima muito frio, onde o manejo de água se torna muito complicado no inverno; e locais com topografia que inviabilize a construção de barragens. Além dessas situações, o método de disposição de rejeito filtrado também será

indicado a locais onde exista maior dificuldade de obtenção de licença ambiental para construção de barragens; locais onde ocorra intensa pressão social contra a construção de barragens; empreendimentos próximos a ocupações humanas (cidades, comunidades, tribos, etc).

4.4.2 Influência do clima na aplicação método

Com relação ao clima do local, SLR Consulting (2016) traz um exemplo prático apresentado na Figura 4.15. O relatório mostra os estudos realizados para a definição do método de disposição de rejeito mais apropriado para o projeto da mina de ouro Magino, em Ontario, Canadá. É possível notar que, considerando a taxa de produção de rejeitos do projeto dessa mina, a média de precipitação do local supera o limite praticado por outros empreendimentos que utilizam o método de disposição de rejeito filtrado. Esse foi um dos motivos que inviabilizaram a aplicação desse método na referida mina.

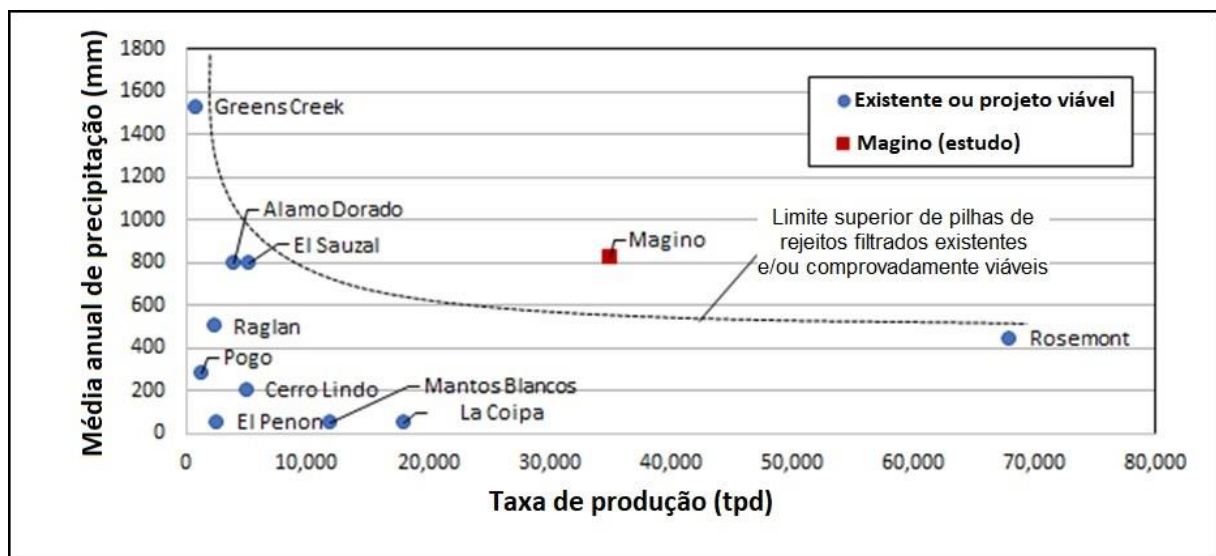


Figura 4.15 – Relação entre precipitação e taxa de produção de rejeitos do projeto da mina Magino em comparação com pilhas de rejeitos filtrados existentes e/ou comprovadamente viáveis (Adaptado de SLR Consulting, 2016)

Locais com alta média de precipitação anual dificultam e podem até mesmo contraindicar a aplicação do método de disposição de rejeito filtrado. A ocorrência de chuvas faz aumentar a umidade do rejeito a ser depositado e ao mesmo tempo diminui a trafegabilidade das vias e da própria pilha de rejeitos. Além disso, a alta média de precipitação irá requerer um sistema de drenagem mais robusto e que demande uma gestão mais intensiva.

A Figura 4.16 traz um gráfico de MEND (2017) contendo a relação entre a taxa de produção diária e a média de precipitação subtraída da média de evaporação, para diferentes minas do estudo. O referido relatório apresenta dados de minerações que responderam ao questionário enviado pelos autores do mesmo. É possível notar a grande abrangência dos métodos convencional e de rejeito espessado. A região contendo os pontos das minas que aplicam o método de disposição de rejeito filtrado se encontra em destaque e aponta que a aplicação desse método tem sido mais comum para minas com produção de rejeito abaixo de 50 mil toneladas diárias e em locais de alta taxa anual de evaporação e/ou baixa média de precipitação anual.

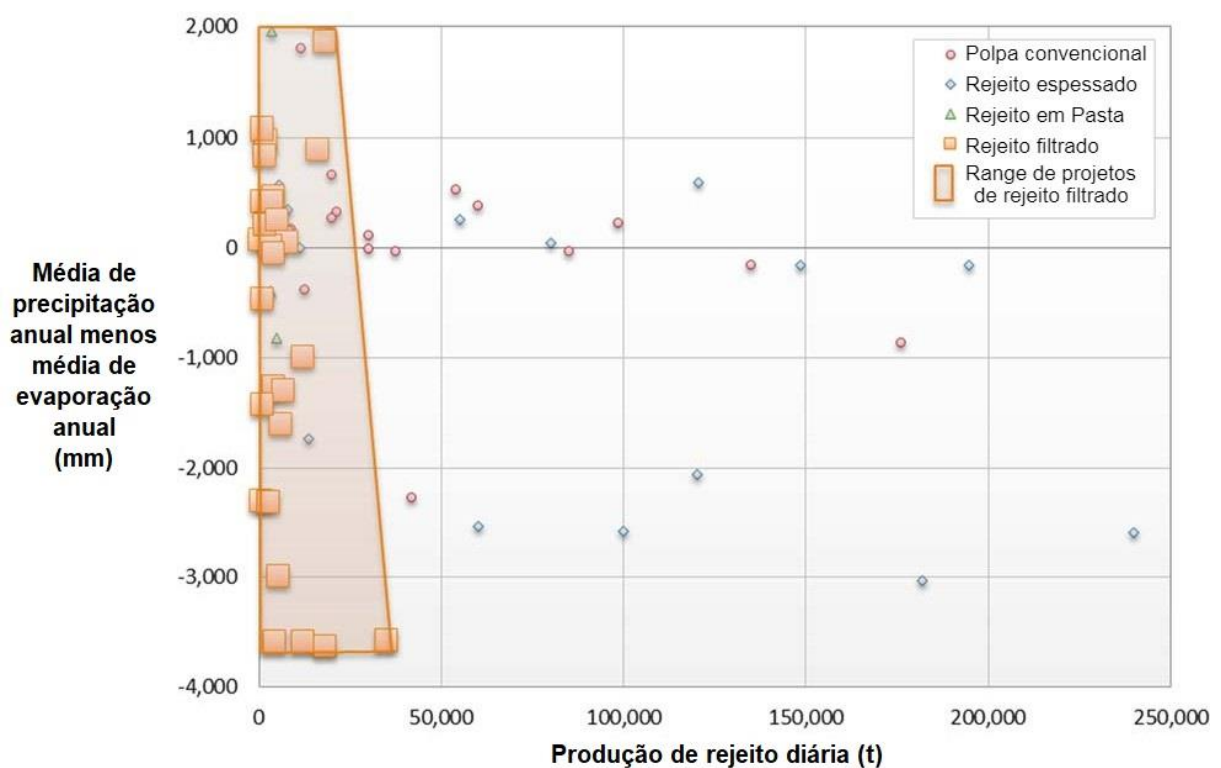


Figura 4.16 – Range de aplicação do método de disposição de rejeito filtrado em projetos existentes (MEND, 2017)

4.4.3 Filtrabilidade

Crystal et al. (2018) afirmam que apenas alguns resíduos contendo quantidades significantes de gipsita (gesso) resultam em material que realmente não seja filtrável e que, por isso, quase todo rejeito é filtrável. A questão é: qual a eficiência e os custos necessários para atingir o nível de umidade requerido para a disposição final. Os mesmos autores afirmam que maiores porcentagens das frações de silte e argila afetam de maneira significativa a eficiência da filtragem, os tempos de ciclo, a possibilidade de colmatção do filtro e o teor de

umidade alcançado. Avaliar e antecipar o potencial de variabilidade da distribuição granulométrica do rejeito e da porcentagem de sólidos em massa da alimentação do filtro durante a vida útil da mina são fatores-chave da disposição de rejeito filtrado.

Ainda segundo Crystal et al. (2018), no começo das operações, frequentemente os engenheiros têm acesso a um montante limitado e não representativo de amostras de rejeitos e, por isso, é importante considerar desde essa fase uma maior faixa de variabilidade da qualidade do minério e das características do rejeito. A Tabela 4.4 destaca alguns dos fatores que influenciam a taxa de filtração.

Tabela 4.4 – Variáveis que afetam a taxa de filtração (Guimarães, 2011)

Sólido	Torta/filtrado	Polpa	Equipamento
<ul style="list-style-type: none"> • Área superficial específica • Distribuição granulométrica • Forma geométrica • Propriedades de superfície • Massa específica 	<ul style="list-style-type: none"> • Espessura da torta • Porosidade do leito • Permeabilidade do leito • Viscosidade do filtrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de alimentação • Porcentagem de sólidos • Temperatura • Viscosidade • pH • Adição de reagentes auxiliares • Presença de sais dissolvidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo • Nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão • Meio filtrante • Geometria dos componentes • Nível de agitação

Com relação à Tabela 4.4, Guimarães (2011) destaca que:

- A taxa de filtração cresce com a redução do ciclo de filtração. Todavia deve-se levar em conta que a redução do tempo de ciclo poderá resultar em uma torta com teor de umidade acima do requerido ou na obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga;
- O aumento da temperatura da polpa favorece a filtração uma vez que ocorre uma redução da viscosidade do filtrado. Porém, ainda que seja possível realizar

o aumento da temperatura por meio da aplicação de vapor superaquecido, essa atividade é excessivamente dispendiosa e assim não é usual em operações industriais;

- Polpas com concentração de sólidos mais elevada favorecem a filtração. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração;
- Rejeitos com distribuição granulométrica mais grosseira formam tortas com maiores interstícios. Dessa forma, o líquido atravessa o meio filtrante com maior facilidade, favorecendo a diminuição do tempo de filtração e reduzindo a umidade da torta;
- O valor de pH da polpa está relacionado ao estado de dispersão das partículas. Em geral, quanto maior a dispersão, menor o fluxo de filtrado e maior a umidade da torta;
- A utilização de reagentes auxiliares de filtração auxilia na passagem do fluxo, reduzindo a tensão superficial do líquido;
- As lamas apresentam um efeito negativo na filtração uma vez que elas podem entupir o meio filtrante. Dessa forma, algumas vezes são adicionados floculantes nos tanques com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração.

Davies (2011) afirma que não somente a distribuição granulométrica, mas também a mineralogia tem importância fundamental na filtração. O autor cita que altas porcentagens de minerais de tamanho inferior a 74 micrômetros, especialmente aqueles contendo argilominerais ou betume residual, tendem a dificultar, e algumas vezes contraindicar, a realização da filtração. É importante prever, desde a fase de projeto, as variações mineralógicas e granulométricas que poderão ser encontradas durante a vida útil da mina. Cada tipo de rejeito apresenta um comportamento único durante a filtração. O sistema de filtração deverá apresentar flexibilidade suficiente para lidar com mudanças futuras nas características do rejeito que sai da planta de beneficiamento a partir de ações com mínimo impacto nos custos.

Williams et al. (2017) também reafirmam que a composição mineralógica e a distribuição granulométrica (e a margem de variação desses fatores) são parâmetros críticos para se atingir a umidade alvo. Os autores também destacam que, uma vez cogitada a opção de disposição de rejeito filtrado, na fase inicial do projeto é fundamental a realização de um estudo que aponte, pelo menos, as seguintes informações:

- Caracterização das amostras:
 - Distribuição granulométrica,
 - Mineralogia,
 - Concentração de sólidos na alimentação,
 - Massa específica dos sólidos,
 - pH da alimentação.
- Triagem química para definir reagente e dosagem adequados para o espessamento;
- Testes de sedimentação, incluindo:
 - Teste de espessador estático;
 - Testes de viscosidade;
 - Teste de espessador dinâmico;
- Testes de filtração:
 - Avaliação da espessura da torta filtrante,
 - Pressão necessária,
 - Teor de umidade da torta filtrante,
 - Tempo de ciclo.

No que se refere à filtrabilidade, Crystal et al. (2018) afirmam que é um equívoco comum o pensamento de que o rejeito pode e deve ser filtrado até atingir o teor de 15% de umidade alvo, como frequentemente citado na literatura técnica e por fornecedores. Os autores afirmam existirem três pontos que devem ser bem entendidos: em primeiro lugar a umidade-alvo de 15% deve ser entendida apenas como um valor de referência, a umidade

atingida ao final da filtragem é frequentemente maior; em segundo lugar o teor de umidade volumétrica é muito maior do que o teor de umidade geotécnico (ou gravimétrico); e em terceiro lugar o teor de umidade “alvo” a partir do filtro prensa deverá condizer com a realidade de cada empreendimento em termos de critérios de projeto, plano de empilhamento, localização, clima, geometria da pilha, dentre outros fatores. Como exemplo, os autores citam a Alcoa Operations em Kwinana, Western Australia, onde o teor de umidade alvo do rejeito é de 30% devido ao plano de empilhamento e ao clima árido da região.

Já a mina Karara, também em Western Austrália, considera o valor mais comum de umidade alvo de 15%, atingindo em média um teor de umidade de 18%, baseado, novamente, no ambiente, no plano de empilhamento e na geometria da pilha. Outro exemplo dado é a mina Escobal, na Guatemala, onde, devido ao alto risco relacionado a eventos sísmicos, os critérios de compactação na zona estrutural são mais rigorosos e a umidade alvo é da ordem de 12% a 13%.

Os valores de umidade (ou teor de umidade) apresentados neste trabalho fazem referência ao teor de umidade geotécnico, calculado pela seguinte equação:

$$\text{Teor de umidade geotécnico} = w_{\text{geot}} = \frac{M_{\text{água}}}{M_{\text{rejeito}}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

w_{geot} = teor de umidade geotécnico

$M_{\text{água}}$ = massa de água

M_{rejeito} = massa de rejeito seco

Crystal et al. (2018) definem o material fora das especificações como sendo aquele contendo teor de umidade acima de 18%, dependendo da umidade alvo da planta de filtragem. De modo a atingir flexibilidade operacional e manejar esse tipo de material, esses autores recomendam a existência de uma empilhadeira radial e uma área (pátio, platô...) grande o suficiente para permitir a estocagem temporária (em torno de 8 a 10 dias, pelo menos) e consequente secagem por evaporação de parte da umidade presente nessa classe de material.

4.4.4 Transporte e disposição do rejeito filtrado

O transporte do material filtrado pode ocorrer tanto por caminhões quanto por correia transportadora, sendo que a decisão entre um ou outro é frequentemente relacionada a aspectos econômicos. Segundo Crystal et al. (2018) o transporte via caminhões se mostra economicamente viável apenas para taxas de produção de rejeito inferiores a 10 mil toneladas por dia. Para taxas maiores, o transporte por correia, incluindo empilhadeiras móveis e empilhadeiras radiais de longo alcance, tende a apresentar custos menores, especialmente os custos relacionados a remanejo de rejeito.

Davies (2011) cita outra questão que deve ser levada em conta na escolha de caminhões para transporte de rejeitos filtrados: a trafegabilidade. O material filtrado transportado geralmente se encontra com umidade próxima ao valor ótimo para a compactação. Uma vez que o aumento da umidade do material depositado faz diminuir a trafegabilidade, em períodos chuvosos a superfície da pilha pode se tornar intrafegável, dificultando a operação e tornando-a mais cara. O mesmo autor afirma que o grau de compactação requerido para garantir o tráfego eficiente de caminhões é frequentemente maior que o grau de compactação necessário para atingir a densidade relacionada à estabilidade geotécnica da pilha. Por isso a preparação do piso para o tráfego de caminhões pode ser vista como uma atividade mais dispendiosa, requerendo um maior cuidado operacional.

Diferentes opções podem ser aplicadas para se atingir o teor de umidade e a densidade desejados na pilha de rejeito filtrado. Uma das opções mais comuns é a disposição de finas camadas de rejeito filtrado, seja por correia ou caminhão, para posterior compactação, especialmente em zonas estruturais. A disposição em camadas finas permite a evaporação pela ação de ventos e da radiação solar e a compactação leva ao aumento da densidade e consequente aumento da estabilidade física da pilha.

Para Crystal et al. (2018) a prática vem mostrando ser preferível realizar a filtragem de rejeitos mais finos (classe de rejeitos mais desafiadora) separadamente. Segundo os autores, realizar essa separação antes de se realizar a filtragem pode representar uma diminuição nos custos de operação. A classe de rejeitos mais fina e desafiadora geralmente apresentará torta filtrante com maior conteúdo de umidade (fora das especificações alvo) e, dessa forma, os autores sugerem a disposição dessa classe em zonas não estruturais do depósito final.

Ainda segundo os mesmos autores, a zona estrutural é uma região mais externa do perímetro do depósito onde ocorre a deposição de material que atende a critérios mais rigorosos, principalmente de umidade e compactação. Já a classe de rejeito filtrado fora dessas especificações é destinada à zona não-estrutural, localizada numa porção mais interna do depósito, como mostra a Figura 4.17.

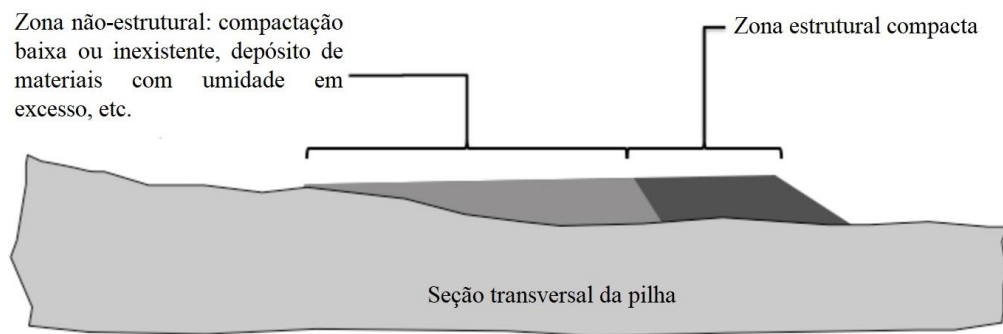


Figura 4.17 – Exemplo de seção de pilha com divisão em duas zonas: estrutural e não-estrutural (Lupo e Hall, 2010)

Essa divisão da pilha em duas zonas também é destacada por Davies (2011) e por Oliveira-Filho e Abrão (2015). Segundo esses autores, uma prática indicada a locais com a estação chuvosa bem definida consiste em realizar a disposição dos rejeitos na parte mais externa do depósito durante a estação seca, realizando a compactação desse material obedecendo a especificações de aterro similares à construção de uma estrutura de contenção. Dessa forma, os rejeitos compactados durante a estação seca, na zona estrutural, funcionam como espaldares para a contenção dos rejeitos filtrados que vierem a ser depositados na porção mais interna (zona não-estrutural) do depósito durante a estação chuvosa. Este material depositado na zona não-estrutural poderá ser simplesmente lançado e/ou espalhado, ou apenas ligeiramente compactado na porção mais interna da pilha de rejeitos filtrados.

Segundo Crystal et al. (2018) o controle da taxa de subida do depósito, como também é recomendável na disposição convencional, é de grande importância para que haja tempo suficiente para ocorrência da drenagem, consolidação do material depositado e dissipação de poropressões. Esse controle, somado a uma rigorosa instrumentação e monitoramento, são fundamentais para minimizar riscos de instabilidade no depósito, pois se o material se torna ou permanece saturado, a pilha se torna suscetível à liquefação e a uma eventual ruptura. Os mesmos autores afirmam que é necessário um cuidado maior com as condições de drenagem, especialmente na base da pilha. Uma vez que o material depositado é úmido, a deposição subsequente de camadas de rejeito na pilha pode levar à saturação das camadas da base. Além

disso, devido aos ajustes operacionais necessários à otimização da filtração durante a fase de implantação do método, as camadas da base tendem a apresentar maior porcentagem de material com maior teor de umidade que o requerido no projeto.

A respeito da gestão de água na pilha, Crystal et al. (2018) citam que para minimizar a infiltração na pilha é necessário que sejam feitas bermas de segurança com pontos para saída da água drenada, além de superfície de topo com caimento suficiente para evitar empoçamento, mesmo em locais de clima árido. Ainda nesse sentido, Davies (2011) afirma que devem ser construídos dois sistemas de drenagem: um para impedir que ocorra contato da água (superficial e freática) do entorno com a pilha de rejeitos filtrados e outro para coletar a água proveniente da própria pilha. Para tanto, o engenheiro deve valer-se dos diferentes tipos de estruturas e drenos disponíveis com o objetivo de evitar ao máximo a possibilidade de problemas relacionados ao aumento da poropressão e à erosão da pilha de rejeitos filtrados.

4.4.5 Aspectos econômicos do empilhamento de rejeito filtrado

Crystal et al. (2018) afirmam que a tecnologia do filtro-prensa não avançou muito nos últimos 20 anos, porém os desenvolvedores têm focado seus esforços em aumentar o tamanho das placas (de 2 x 2 m a 5 x 5 m) e reduzir os custos operacionais (OPEX) (por meio de meios filtrantes mais duráveis e melhorias na eficiência do processo: tempo de ciclo, pressão de ar, ciclo de lavagem, etc). Os autores também afirmam que a disposição de rejeitos filtrados vem provando ser uma alternativa viável para a gestão de rejeitos de mineração, inclusive para taxas de produção de rejeito superiores a 30 mil toneladas por dia. Para locais com altas taxas de produção de rejeito os custos de capital (CAPEX) podem ter a mesma ordem de magnitude do método de disposição convencional. Todavia, os custos operacionais (OPEX) tendem a ser muito maiores na técnica de rejeitos filtrados e a diminuição da diferença entre esses custos depende muito da seleção de estratégias que melhor se adéquem à realidade do empreendimento, diminuindo os riscos e incertezas da aplicação da técnica. Fatores como: distância média de transporte, locação, compactação e necessidade de remanejo de materiais aumentam de maneira significativa o custo unitário desse método em comparação com o método convencional.

Gomes et al. (2016) apontam que o investimento necessário para a implantação de uma planta de filtração pode ser inferior ao investimento necessário para a disposição convencional de rejeitos. Os autores verificaram que o custo para realização do alteamento da

barragem de rejeitos da Mina Pau Branco (da ordem de U\$ 35 milhões) era sete vezes o total de investimento necessário para a instalação da planta de filtragem de rejeitos que, desde 2015, opera na referida mina.

Segundo Crystal et al. (2018), o controle de OPEX no manejo de rejeito filtrado exige que ocorra uma interface próxima e uma grande integração entre proprietários, projetistas, operadores e fornecedores de equipamentos nas etapas de planejamento e execução. Os autores afirmam que, devido aos avanços tecnológicos nos equipamentos de filtragem nos últimos anos, houve uma notável diminuição da diferença entre o OPEX do método convencional e o OPEX do método de disposição de rejeito filtrado. Os autores citam também que o OPEX para disposição convencional é da ordem de U\$ 1,00 (um dólar) por tonelada, enquanto o OPEX para disposição de rejeito filtrado gira em torno de U\$ 2,00 (dois dólares) a U\$ 3,50 (três dólares e cinquenta centavos) por tonelada de rejeito filtrado. O desenvolvimento progressivo do método continuará diminuindo a diferença entre os custos operacionais dos dois métodos. Todavia, é de se esperar que essa margem permaneça, pelo menos, entre U\$ 1,00 (um dólar) e U\$ 1,50 (um dólar e cinquenta centavos) por tonelada.

Continuando a discussão a respeito do capital requerido para realização do método de disposição de rejeitos filtrados, MEND (2017) traz a Tabela 4.5, comparando os custos operacionais estimados para a aplicação das técnicas mais comuns de disposição de rejeitos. Os autores lembram que os custos são muito específicos para cada local e projeto. Os valores mostrados nessa tabela têm finalidade indicativa, para ilustrar a relativa faixa de custos das técnicas de desaguamento. Os autores do referido relatório afirmam ainda que as informações coletadas para a realização do estudo não foram suficientes para se atingir uma comparação precisa dos custos relativos entre as técnicas estudadas. Ainda segundo os autores, as informações de domínio público relacionadas aos custos de capital e de operação das técnicas de disposição de rejeitos são muito limitadas. Existe uma resistência muito grande, por parte dos detentores dessas informações, no sentido de compartilhá-las, ainda que o objetivo daqueles que solicitam essas informações seja o de impulsionar o desenvolvimento das técnicas.

Tabela 4.5 – Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e de fechamento) (MEND, 2017)

Tecnologia de desaguamento	Custo típico de processamento e de transporte (U\$/t)	Custo típico de gestão das estruturas de contenção e da água (U\$/t)	Total (U\$/t)	Margem de custo (U\$/t)
Convencional (não desaguado)	0,20	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado	0,30	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado de alta densidade	0,50	0,90	1,50	0,75 a 2,50
Pasta	1,50	0,50	2,00	2,00 a 8,00
Filtrado	5,00	0,20	5,20	4,00 a 12,00

O fato de as informações relacionadas ao método de disposição de rejeito filtrado serem limitadas somado à grande faixa de variação de custos de operação torna difícil a tarefa de definição dos custos praticados nesse método em comparação com os demais. Carneiro e Fourie (2018) trazem um exemplo em que os custos para filtrar, carregar, transportar, espalhar e compactar um mesmo tipo de rejeito pode variar de A\$ 1,00 a A\$ 3,50 (dólar australiano) por tonelada. Os mesmos autores também afirmam que o custo de uma planta de filtragem pode ser 17 vezes maior que o custo de uma planta de espessamento convencional e 10 vezes mais cara que uma planta para rejeitos espessados. Todavia, o custo unitário do rejeito filtrado tende a se tornar menor na medida em que os equipamentos de filtragem se tornam cada vez mais tecnológicos. Além disso, o aumento da escala de produção de rejeitos e a utilização de correias transportadoras (em vez de caminhões) também tendem a diminuir o custo unitário de disposição de rejeito filtrado.

Davies (2011, citado por Portes, 2013) já mencionava que a técnica de filtragem de rejeitos estava se tornando cada vez mais comum em muitas minas no mundo. De acordo com o autor, como pode ser visto na Figura 4.18, no ano de 2010 existiam mais pilhas de rejeitos filtrados dispostos em superfície do que depósitos de rejeitos descartados em forma de pasta. Davies (2011) afirma que, à época da realização de seu trabalho, a quantidade de informações disponíveis a respeito da filtragem de rejeitos não acompanhava a tendência de aumento de utilização dessa técnica. A quantidade de trabalhos a respeito da mesma era escassa. O contrário ocorria com os métodos de disposição de rejeito espessado e em pasta: apesar não serem tão empregados quanto a filtragem de rejeito, a quantidade de trabalhos contendo informações a respeito dessas técnicas crescia e era muito superior à quantidade de informações a respeito do método de filtragem de rejeito.

Carneiro e Fourie (2018) também reafirmam a escassez de informações de domínio público a respeito dos custos das tecnologias de desaguamento necessários às tomadas de decisões na gestão dos rejeitos. Acredita-se que essa tendência ainda é verificada nos dias atuais.

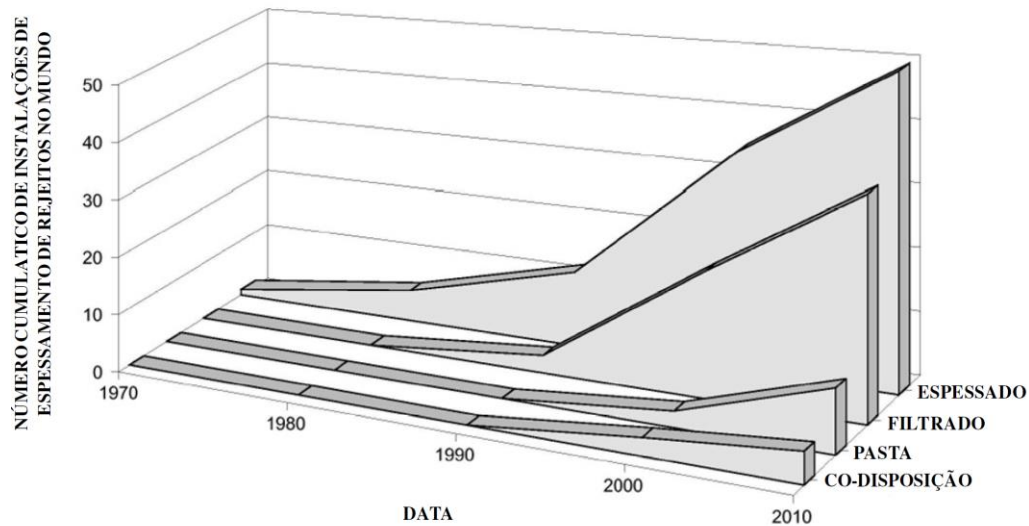


Figura 4.18 – Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (Portes, 2013)

Davies (2011) também afirma que a falta de material de leitura e orientação a respeito da disposição de rejeito filtrado, e consequente desinformação, podem ter levado a decisões equivocadas no manejo de rejeitos. À época da realização de seu trabalho (2011), o autor já previa que a pressão por técnicas alternativas de manejo de rejeitos tenderia a se intensificar. Essa pressão somada à necessidade de melhor manejo da água e ao surgimento de tecnologias de filtragem cada vez mais robustas e desenvolvidas permitiram que o método de disposição de rejeito filtrado se destacasse como excelente alternativa para determinados empreendimentos.

Uma das maiores vantagens do método de disposição de rejeito filtrado é a facilidade de se realizar a recuperação da pilha e a possibilidade de começar a fazê-lo desde estágios iniciais de construção da pilha. Segundo Davies (2011) essa recuperação progressiva é frequentemente marcada pela colocação de coberturas temporárias e pela revegetação de superfícies da pilha, dificultando, assim, a erosão por intemperismo. Outro importante elemento citado pelo autor para garantir o efetivo fechamento da pilha é assegurar a integridade e a redundância dos, já citados, sistemas de drenagem superficial.

Davies (2011) apresenta um resumo de lições aprendidas na aplicação do método de disposição de rejeito filtrado em diferentes empreendimentos. Nesse sentido, destacam-se os seguintes pontos:

- A divisão da pilha em zona estrutural e zona não-estrutural é essencial para a eficiência do método e redução das limitações inerentes ao mesmo;
- Se uma pilha é construída dentro dos critérios requeridos de umidade e compactação, a infiltração é insignificante e a probabilidade de ressaturação é extremamente baixa. Portanto, é preferível concentrar recursos na construção de um sistema de drenagem superficial eficiente, em vez de direcionar esses recursos na construção de um sistema para coleta de água de infiltração proveniente da pilha.
- A construção de canaletas de proteção é essencial para desviar o fluxo de água superficial que iria em direção à pilha, impedindo a ocorrência de erosão;
- Na ocorrência de chuvas intensas, a utilização de lonas é uma excelente opção para proteção temporária de áreas que ainda não foram compactadas;
- A existência de uma área próxima à planta de filtragem para a deposição temporária de material filtrado é fundamental para garantir a flexibilidade operacional em momentos em que a operação de filtragem venha a passar por períodos de desafios.

Ainda segundo Davies (2011), o método de disposição de rejeito filtrado deve ser visto como uma alternativa possível e não como uma panaceia para a gestão do rejeito de mineração. Na visão de Williams et al. (2017) os detalhes específicos do processo de cada empreendimento e o ambiente socioeconômico do local influenciarão os resultados alcançados. Além disso, esses autores citam que a seleção de parceiros com experiência nessas questões e na aplicação geral do método são fundamentais para se alcançar o sucesso de um projeto.

A Tabela 4.6 traz um resumo de informações de algumas minas, segundo SLR Consulting (2016).

Tabela 4.6 – Quadro resumo comparando diferentes minas (SLR Consulting, 2016)

LOCAL	RAGLAN	GREENS CREEK	POGO	MANTOS BLANCOS ¹	LA COIPA	EL SAUZAL	EL PEÑON	CERRO LINDO	ALAMO DORADO	ROSEMONT (projeto)	MAGINO (projeto)
Taxa de produção de rejeito (tpd)	2.400	800	1.250	12.000	18.000	5.300	2.600	5.000	4.000	68.000	35.000
Método de disposição	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Dry Stack	Espessado ou Convencional
Razão de adoção do método de disposição de rejeitos	Necessidade de recuperação da água devido local ser sujeito a congelamento . O rejeito é reativo.	Minimizar footprint. Melhor estabilidade sísmica.	Falta de local viável para disposição convencional	Conservação da água em ambiente árido e estabilidade sísmica aprimorada.	Conservação da água em ambiente árido combinado com clima frio e maior estabilidade sísmica.	Terreno íngreme e acidentado próximo à usina.	Conservação da água em ambiente árido e estabilidade sísmica aprimorada.	Conservação da água em ambiente árido e estabilidade sísmica aprimorada.	Local selecionado para disposição em terreno íngreme e acidentado próximo à usina.	Conservação da água em ambiente árido combinado com maior aceitação regulatória	Empilhamento de rejeitos seria desafiador devido a taxa de produção proposta e condições climáticas
Equipamento	Filtro Prensa	Filtro Prensa	Filtro Prensa	Peneira vibratória	Filtros a vácuo	Filtros a vácuo	Filtros de correia	Filtros de correia	Filtros a vácuo	Filtro Prensa	Espessadores convencionais
Manejo e disposição do material	Transporte por caminhão, espalhado e compactado por trator	Transporte por caminhão, espalhado por trator e compactado por rolo	Transporte por caminhão. Codisposição com estéril	Correia com empilhadeira móvel (não compactado)	Correia com empilhadeira móvel (não compactado)	Transporte por correia até estocagem temporária e depois por caminhão	Transporte e descarga por caminhão (não compactado)	Transporte por caminhão, espalhado e compactado por trator	Transporte por correia até estocagem temporária e depois por caminhão	Correia com empilhadeira móvel	Tubulação (gravidade e bombeamento)
Localização	Quebec, Canadá	Alaska, EUA	Alaska, EUA	Antofagasta, Chile	Atacama, Chile	Chihuahua, México	Chile	Província de Chíncha, Peru	Sonora, México	Arizona, EUA	Ontário, Canadá
Temperat. Méd. anual (°C)	-8°C	5°C	-3°C	16°C	Congelamento o ano todo	18°C	(2)	(2)	26°C	22°C	3°C
Precipit. média anual (mm)	500	1,530	280	<50	<50	800	<50	200	800	440	820
Evapor. média anual (mm)	Nota 3	510	Nota 2	>2,000	>2,000	2,400	>2,000	1,500	(2)	1,820	455

Obs.: 1. Mantos Blancos realiza disposição da maior parte do rejeito por método convencional. Empilhamento do rejeito realizado somente para fração menos fina; 2. Não informado.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS FILTRADOS

Este item apresenta informações a respeito de empreendimentos e projetos que usam o método de disposição de rejeitos filtrados. A aplicação desse método não se restringe aos exemplos apresentados neste trabalho. Outros projetos estão em desenvolvimento e o empilhamento de rejeito filtrado já vem ocorrendo em outras minerações do Brasil e do mundo. A publicação da revista *In the Mine* (2019) confirma esse fato e cita como exemplos:

- Mina Cuiabá, da AngloGold Ashanti, em Sabará – MG. Na qual ocorre a filtragem de 50% do rejeito;
- Mina Córrego do Sítio, da AngloGold Ashanti, em Santa Bárbara – MG. Na qual ocorre a filtragem de cerca de 40% do rejeito;
- Planta do Queiroz, da AngloGold Ashanti, em Nova Lima – MG. Onde vem ocorrendo a filtragem de 15% dos rejeitos;
- Mina da CBA em Miraí – MG. Projeto de filtragem de rejeitos e disposição final na barragem Palmital, com investimento de R\$ 300 milhões e previsão de conclusão em 2022;
- Mina Roça Grande, do Complexo de Mineração Caeté (CCA) - MG, da Jaguar Mining. Sistema de filtragem de rejeitos com início de operação previsto para 2020.

Outros exemplos são a filtragem de rejeito de minério de ferro utilizando-se filtros de disco cerâmico na Herculano Mineração, em Itabirito-MG, e a filtragem com filtro prensa e empilhamento de rejeitos industriais da planta de beneficiamento de bauxita da Hindalco, em Ouro Preto – MG, com investimentos da ordem de R\$ 23 milhões.

Além desses exemplos, um outro destaque é o projeto de retomada das operações de exploração e beneficiamento de minério de ferro no Complexo Germano, pertencente à Samarco, em Mariana – MG. Esse projeto prevê que 80% do rejeito total (parte arenosa) será filtrado e empilhado. Já o restante do rejeito total (composto por lama) será depositado na cava de Alegria Sul, já exaurida.

As localizações dos empreendimentos citados e de alguns dos exemplos que serão descritos nos próximos subitens são apresentadas na Figura 5.1. É possível perceber que as

minerações do Quadrilátero Ferrífero estão se empenhando para aplicar o método de empilhamento de rejeito filtrado.



Figura 5.1 – Localizações de empreendimentos/projetos citados com aplicação de filtragem de rejeitos (Google Earth, 2019)

A seguir são destacados os exemplos de aplicação do método dos empreendimentos cujas localizações podem ser verificadas na Figura 5.2. Além desses, destaca-se também um empreendimento mineiro localizado na Guatemala.

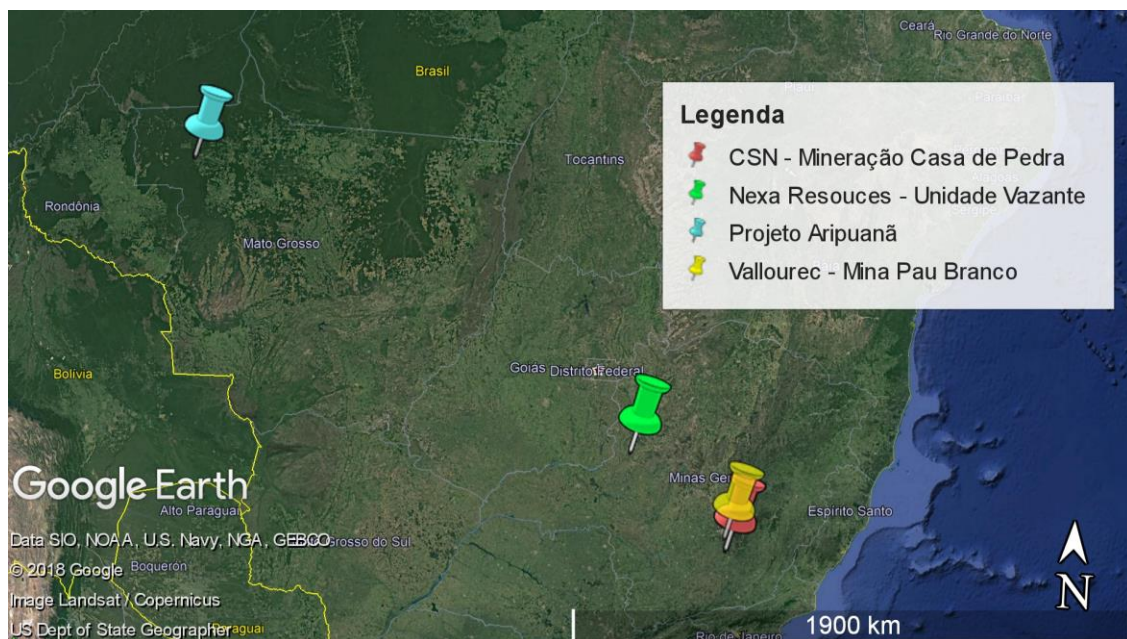


Figura 5.2 – Exemplos de empreendimentos brasileiros destacados neste trabalho (Google Earth, 2019)

5.1 Mina Pau Branco

A Mina Pau Branco pertence à empresa Vallourec e está localizada na Serra da Moeda, Município de Brumadinho, no limite com o município de Nova Lima, próxima à Lagoa dos Ingleses. A extração de minério de ferro ocorre desde o início da década de 1980. Atualmente a empresa realiza a extração de três tipos de minério de ferro: hematita, goethita e itabirito. A produção atual gira em torno de 5 milhões de toneladas de minério de ferro por ano.

Um projeto com o objetivo de praticamente dobrar a capacidade produtiva da mina está em fase de licenciamento. As obras desse novo projeto têm previsão de término em 2021. Para concretização dessa expansão está previsto um investimento total da ordem de 220 milhões de reais.

A Mina Pau Branco começou a realizar a disposição de rejeitos filtrados em 2015 e é considerada a primeira mina a utilizar esse método em rejeitos de minério de ferro. Uma nova planta de filtragem de rejeito começou a ser implantada no início de 2019 e atualmente se encontra em fase de *ramp up*.

A filtragem dos rejeitos produzidos na unidade começou a ser realizada em dezembro de 2015 a partir de uma planta contendo dois filtros prensa idênticos, modelo TERRAE 1500 x 2000 da fabricante Matec. A planta em questão é apresentada na Figura 5.3. Cada um dos filtros contém 140 placas (cada uma de dimensões 1,5 x 2 m) e capacidade de produção de 80 toneladas de rejeito por hora. Atualmente, todo o rejeito produzido tem sido filtrado. Uma nova planta de filtragem, contendo um filtro de 190 placas (de 2 x 2 m) e taxa de produção de cerca de 150 toneladas por hora, está em fase de *ramp-up*. Além disso a mina vem contando com um outro filtro, mostrado na Figura 5.4, modelo Cube Terrae 1500 x 2000, de menor dimensão, contendo 100 placas, com capacidade para a produção de 50 toneladas por hora, alugado em março de 2019 para proporcionar um aumento de produção.



Figura 5.3 – Planta de Filtragem de Rejeitos 1 da Mina Pau Branco com vista da antiga barragem de rejeitos e de condomínio habitacional próximo à mina. (Matec, 2019)



Figura 5.4 – Filtro prensa alugado para aumento de produção na Mina Pau Branco. (Matec, 2019)

O rejeito que alimenta a filtragem sai do espessador com densidade entre 1,5 e 1,7 g/cm³. Alimentação com densidade abaixo de 1,5 g/cm³ irá dificultar a atividade de filtragem e acima de 1,7 g/cm³ irá dificultar o bombeamento do rejeito. O rejeito espessado é armazenado em dois tanques, um deles armazena o transbordo do tanque de alimentação da nova planta de filtragem, e o outro, apresentado na Figura 5.5, recebe rejeitos diretamente do espessador da planta de beneficiamento. São necessários 4 operadores na Planta de Filtragem de Rejeitos 1.

Uma das maiores dificuldades encontradas na planta, além dos eventuais desvios operacionais, é a troca dos elementos filtrantes. Isso porque o espaço da planta é reduzido e a troca do tecido filtrante é feita manualmente e sem que ocorra a retirada da placa do filtro. Dessa forma a questão ergonômica para a troca do elemento filtrante é bastante desfavorável.

Um tecido de malha aberta é colocado entre o tecido filtrante e a placa, de maneira a proteger o primeiro e assim aumentar o tempo de vida útil do mesmo. O tecido filtrante utilizado tem, em média, uma vida útil de 1.500 horas na porção dos extremos do filtro. Já nos blocos intermediários de cada filtro a durabilidade varia de 2.500 a 3.000 horas de vida útil.



Figura 5.5 – Tanque de alimentação da Planta de Filtragem 1 da Mina Pau Branco. (Matec, 2019)

Os tempos de ciclo de cada um dos filtros da Planta de Filtragem de Rejeito 1 giram em torno de 17 a 20 minutos. Em geral a torta filtrante é descarregada do filtro com teor de umidade em torno de 15%, até no máximo 17%. Umidades menores podem ser conseguidas, mas à custa de um maior tempo de ciclo e consequente diminuição da taxa de produção. O material filtrado é descarregado em baias logo abaixo do filtro, como mostrado na Figura 5.6. Uma carregadeira faz a limpeza das baias, retirando o material descarregado pelos filtros, como ilustra a Figura 5.7, e carrega caminhões com capacidade para 40 toneladas. O material carregado é então transportado para uma antiga pilha de estéril, na qual atualmente é realizada disposição tanto de rejeito quanto de estéril, por meio do método conhecido como codisposição. A distância média de transporte da planta de filtragem para pilha é de cerca de um quilômetro.



Figura 5.6 – Esboço da planta de filtragem e foto da descarga em uma das baias (Matec, 2019)

Na pilha, os caminhões realizam o basculamento do material no local determinado, formando um conjunto de pequenas pilhas de rejeito e de estéril. A proporção entre esses materiais nas atividades de disposição é de, geralmente, 2 de rejeito para 1 de estéril (2R:1E). Muitas vezes a proporção e distribuição das pilhas de basculamento na área da pilha acontece levando-se em conta o aspecto visual do rejeito que chega até lá. Ou seja, quando constatado um material (rejeito) com maior umidade do que o habitual, o basculamento é realizado próximo da pilha de estéril existente, de modo a tentar compensar o excesso de umidade do rejeito. Além disso, no período chuvoso, a proporção de estéril na deposição também aumenta, como forma de compensar o aumento da umidade do material depositado. As pequenas pilhas de basculamento de rejeito e de estéril são, então, espalhadas e compactadas, utilizando-se para isso um trator de esteiras e uma motoniveladora.



Figura 5.7 – Material descarregado pelos filtros sendo retirado das baias por pá carregadeira. (Matec, 2019)

A média de precipitação anual, calculada considerando valores dos últimos 30 anos é de 1.461 mm. Dezembro e janeiro são os meses com maior incidência de chuvas. O período chuvoso se estende do final de outubro ao final do mês de março. Durante esse período as atividades de transporte, disposição e compactação de rejeito e estéril se tornam um desafio, pois a trafegabilidade das vias diminui vertiginosamente, demandando um grande empenho da equipe de disposição para continuidade das operações. Um dos motivos desse empenho ser altamente necessário é a ausência de um pátio de estocagem temporária próximo à planta de filtragem. Dessa forma não é possível estocar o material filtrado por um período de tempo antes de transportá-lo para a pilha. A Figura 5.8 apresenta uma visão em planta de algumas das principais estruturas da mina.

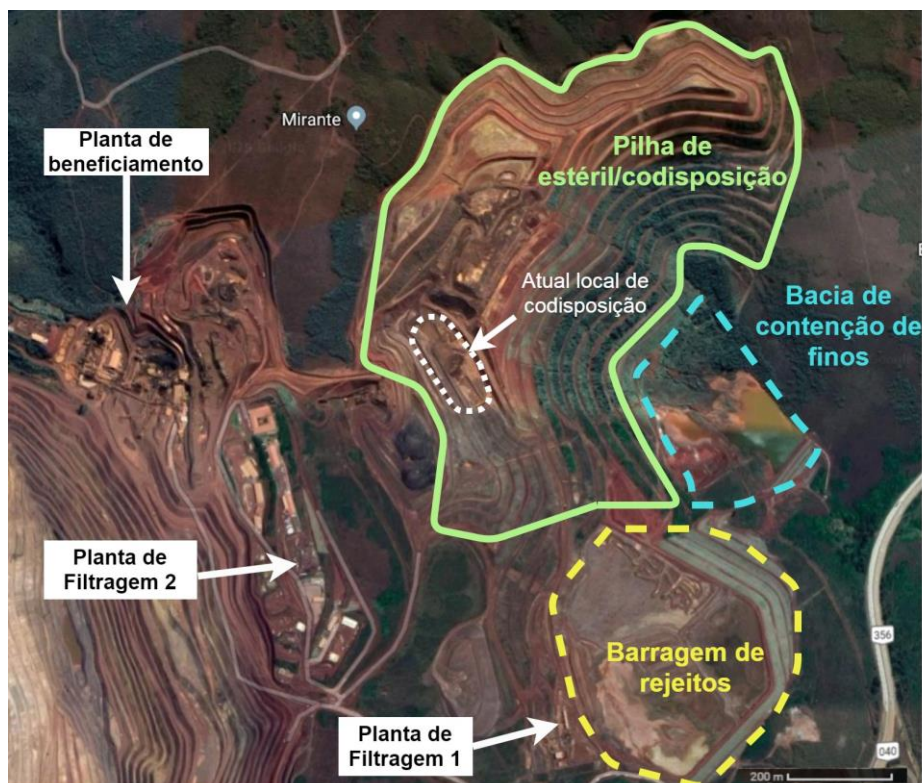


Figura 5.8 – Vista em planta de algumas das principais estruturas da Mina Pau Branco (Google Maps, 2019)

Dessa forma, já que todo o rejeito gerado nessa mineração é filtrado, a filtragem de rejeito pode ser entendida como um gargalo da Mina Pau Branco: mesmo em condições adversas (como um período de chuvas intensas) as operações de filtragem, transporte e disposição de rejeito não param. Em caso de parada dessas operações, a planta de beneficiamento de minério, por consequência, também irá parar. Isso faz com que alguns problemas ou desvios de menores proporções tenham que esperar algum tempo para solução, uma vez que a parada de um filtro tem impacto direto na taxa de produção de toda a mina. A

produção de minério está diretamente conectada à produção e empilhamento do rejeito filtrado.

A pilha está sendo construída com bancadas de 10 metros de altura, bermas de 10 metros de largura e taludes com 30° de inclinação. Existe um sistema de drenagem para coleta de águas internas e externas à pilha que levam até a bacia de contenção de finos ao pé da mesma.

A Mina Pau Branco está em fase de licenciamento para a expansão da sua produção. A Planta de Filtragem 2, atualmente em *ramp up*, já é uma das ações concretizadas desse projeto. Fato interessante e importante de se destacar é que, atualmente, já vem ocorrendo a lavra de material em algumas porções da pilha de estéril e, além disso, está prevista, para um futuro próximo, a lavra do próprio material que está sendo empilhado nos dias atuais pelo método de codisposição. Em alguns anos todo esse material alimentará a planta de beneficiamento que está sendo construída (UTM-2). E o rejeito gerado na UTM-2 será novamente filtrado e empilhado.

5.2 Mina Casa de Pedra

A Mineração Casa de Pedra, mineração de ferro mais antiga em operação no Brasil (início em 1913), é um empreendimento pertencente à Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, localizado no município de Congonhas, a cerca de 70 Km de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. A mina, operada pela CSN desde 1946, realiza as atividades de lavra, beneficiamento e embarque de minério de ferro e calcula-se que tenha 6 bilhões de toneladas em recursos e 3 bilhões de toneladas em reservas.

O minério é lavrado em quatro corpos e segue para beneficiamento na Planta Central (rota úmida) ou nas Plantas Móveis (rota seca), localizadas próximas às áreas de extração. Atualmente a mina possui capacidade de produção de 30 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. Os produtos resultantes do processo de beneficiamento são: granulado, *sinter feed* e *pellet feed*. O transporte do minério até Porto de Itaguaí (TECAR) é realizado por meio de ferrovia, com terminais ferroviários localizados em Casa de Pedra e no Complexo do Pires. A mina Casa de Pedra tem vida útil prevista para até 2052.

Além da finalização do período de *ramp up* da segunda planta de filtragem de rejeitos, a CSN tem mais dois grandes projetos para expandir a produção de minério de ferro: duas plantas de beneficiamento de itabiritos pobres serão construídas. A primeira em processo de instalação, com previsão de *ramp up* em 2021 e capacidade para 10 milhões de toneladas de minério por ano e a segunda, com capacidade para produção de 20 milhões de toneladas de minério por ano, terá sua construção iniciada assim que a primeira já estiver em plena operação. Esses projetos de expansão já preveem a filtragem e disposição em pilhas de todo o rejeito gerado na mineração Casa de Pedra.

A mineração Casa de Pedra contém em seu complexo uma das maiores barragens de rejeito localizadas em área urbana do mundo, com capacidade para 50 milhões de metros cúbicos. A proximidade entre barragem e área urbana é visível e tem como consequência uma evidente preocupação, com relação à segurança, por parte de moradores do município e representações governamentais. Em agosto de 2018 teve início a operação de filtragem de rejeito para disposição em pilhas, de maneira a permitir a continuidade e expansão da produção de minério sem que seja necessária a utilização de barragens para conter o rejeito. Atualmente 45% do rejeito gerado está sendo filtrado e empilhado.

A primeira Planta de Filtragem de Rejeito abriga quatro filtros prensa modelo Magnum 2000 x 2000 da fabricante Matec, cada um deles contendo 193 placas. Está em fase de *ramp up*, desde agosto de 2019, uma nova planta de filtragem (Planta de Filtragem de Rejeito 2), contendo 5 filtros prensa semelhantes aos da primeira planta. Dois desses filtros já vêm sendo operados pela equipe de implantação seguindo os parâmetros de projeto. Existe a previsão de que no início de 2020 a segunda planta de filtragem entre em total funcionamento e que, assim, 100% do rejeito gerado seja filtrado e depositado na pilha. Atualmente a produção de rejeitos filtrados gira em torno de 20 mil toneladas por dia.

Antes de ser filtrado na Planta de Filtragem 1, o rejeito passa por um concentrador magnético, com o objetivo de recuperar parte do minério contido nesse material. Em seguida o rejeito é direcionado ao tanque pulmão das duas plantas de filtragem, ilustrado na Figura 5.9. O rejeito é então bombeado a um tanque que também recebe rejeitos da deslamagem, realizando assim uma mistura de 45% de rejeito arenoso proveniente da flotação e 55% de rejeito fino da deslamagem. O rejeito contido nesse tanque, contendo por volta de 19% de sólidos em massa, é bombeado para os três espessadores (cada um com capacidade para 550

m³). Ocorre, antes do espessamento, a injeção de flocculante dentro da tubulação. O *underflow* dos espessadores, contendo densidade entre 1,5 e 1,55 g/cm³ e 50% de sólidos em massa, é direcionado ao tanque de alimentação dos filtros. A distribuição granulométrica do rejeito que alimenta a filtração é ilustrada na Figura 5.10. O material que alimenta os filtros apresenta d50 e d80 iguais a 20 µm e 74 µm, respectivamente.



Figura 5.9 – Descarga da polpa de rejeito no tanque pulmão de alimentação das plantas de filtração de rejeito da Mina Casa de Pedra. (Leone, 2019)

A bomba que alimenta os filtros só entra em operação caso um dos filtros esteja disponível e, ao mesmo tempo, haja nível suficiente no tanque para o preenchimento completo do filtro. Caso não haja nível suficiente no tanque, a bomba não entra em funcionamento, evitando-se assim o arranque e parada intermitentes da bomba sem que se preencha o filtro (já que isso poderia diminuir a vida útil dos motores das bombas). Existe um revezamento entre os quatro filtros da planta de filtração, de forma que, a cada dia, um deles está em manutenção preventiva. A Figura 5.11 traz uma vista geral da Planta de Filtração de Rejeitos 1 da Mina Casa de Pedra.

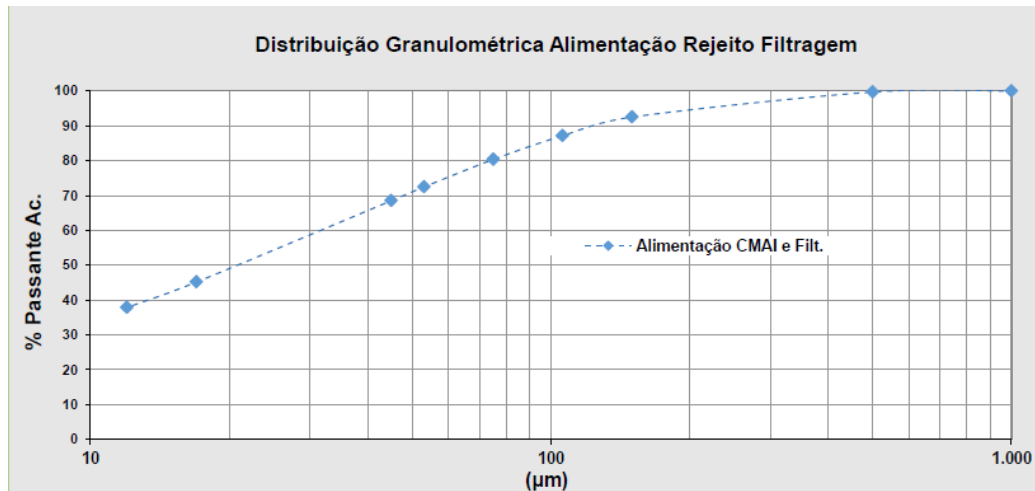


Figura 5.10 – Distribuição granulométrica (% passante acumulada) da alimentação do planta de filtragem (Leone, 2019)



Figura 5.11 – Vista geral da Planta de Filtragem 1 da Mina Casa de Pedra. (Matec, 2019)

O teor de umidade alvo para a torta filtrante é de 14% e atualmente o material está saindo da planta de filtragem com umidade média de 16,5%. Apesar dessa diferença, não há relatos de impactos negativos na disposição final. Realizada a filtragem, ao final do ciclo a torta filtrante é descarregada sobre uma das duas correias transportadoras abaixo da planta de filtragem (uma correia para cada 2 filtros em série) e a água recuperada é reutilizada no processo. Cada filtro apresenta taxa de produção em torno de 90 toneladas por hora. As correias direcionam o rejeito filtrado para uma empilhadeira radial que realiza o empilhamento do filtrado no pátio de estocagem temporária. Este último equipamento, mostrado na Figura 5.12 permite a formação de diferentes pilhas em um grande pátio com cerca de 8.000 m², tornando possível que enquanto uma pilha está recebendo material, outras pilhas, já formadas, são a fonte de carregamento de caminhões com capacidade de 30 a 40

toneladas, a partir de uma pá carregadeira, para posterior transporte até o local de disposição na pilha. Isso permite a estocagem temporária do material nessas pilhas, necessária especialmente nos períodos chuvosos, que se estendem do final de outubro ao final de março, ou na ocorrência de neblina intensa. Esses fenômenos dificultam e podem, até mesmo, impossibilitar o tráfego de caminhões. A média de precipitação anual é de 1472 mm, sendo dezembro e janeiro os meses com maior incidência de chuvas, com médias de 325 mm e 296 mm, respectivamente.



Figura 5.12 – Empilhadeira radial utilizada para descarga no pátio de estocagem temporária. (Leone, 2019)

Caso ocorra a formação de fila de caminhões no pátio de estocagem temporária, uma escavadeira é acionada para auxiliar no carregamento dos mesmos. O rejeito filtrado, após ser transportado por caminhão, é lançado, espalhado e compactado na superfície formada pelo material disposto da Barragem B5, uma antiga barragem de rejeito construída em 1993, contendo 32 metros de altura e 455 metros de crista, da qual foi previamente drenada a água sobrenadante.

No início da operação da Planta de Filtragem 1 as trocas de placas ocorriam manualmente. Isso dificultava o transporte e reposição das placas, reduzindo a disponibilidade dos filtros. Após essa constatação foi instalada uma talha elétrica que se movimenta no entorno do teto da planta de filtragem e permite que as placas sejam içadas e transportadas para realização dessas trocas. Em uma das extremidades da planta existe um local contendo placas sobressalentes onde uma equipe trabalha somente para realizar a troca dos tecidos filtrantes das placas retiradas dos filtros. Isso favorece a disponibilidade do filtro, uma vez

que a troca de placas com tecidos danificados e a troca preventiva são feitas de maneira mais ágil.

A alimentação do filtro ocorre por meio do bombeamento da polpa por um dos lados do filtro. Consequentemente, acontece um maior desgaste dos tecidos das primeiras placas do lado no qual ocorre a alimentação. Adotou-se, por isso, a prática de, a cada dia, trocar as 20 primeiras placas do lado onde ocorre esse maior desgaste por placas com malhas filtrantes novas. Além, é claro, de realizar as trocas já previstas das placas com tecidos próximos ao final da vida útil e daqueles danificados.

Um dos desafios encontrados atualmente na planta de filtragem diz respeito à durabilidade do tecido filtrante. Os tecidos têm se desgastado e rasgado com uma frequência maior do que a esperada. Os motivos disso podem estar relacionados tanto à qualidade do tecido quanto à presença de material grosseiro acima do normal. Isso tem gerado a necessidade de realizar paradas nos filtros para a troca das placas com tecidos danificados, diminuindo, assim, a disponibilidade do filtro. A Figura 5.13 mostra um bloco de placas contendo tecidos recém-colocados (manutenção preventiva) e outro bloco de placas contendo tecidos filtrantes com várias horas de uso.



Figura 5.13 – Placas de um dos filtros prensa da Planta de Filtragem de Rejeito 1 da Mina Casa de Pedra. (Leone, 2019)

Atualmente a equipe de implantação está operando a Planta Filtragem de Rejeito 2. As obras para implantação ocorrem simultaneamente com a realização de ciclos de filtragem seguindo os parâmetros de projeto. Cada um dos 5 filtros dessa nova planta possui uma correia transportadora e uma talha independentes. Cada uma dessas correias entra em funcionamento somente a partir da descarga do seu respectivo filtro, em seguida ela desliga automaticamente. Acredita-se que isso terá como consequência a economia de energia. Todavia será preciso verificar, durante as operações, se o motor de partida terá durabilidade tal que suporte os recorrentes ciclos de liga/desliga e, assim, compense a energia economizada.

A Tabela 5.1 apresenta os custos aproximados de operação por tonelada de rejeito na Mina Casa de Pedra. O custo de capital para a realização da filtragem de rejeitos é de aproximadamente R\$ 250 milhões.

Tabela 5.1 – Custos operacionais médios dos métodos de disposição de rejeito da Mina Casa de Pedra

Método de disposição de rejeito	Item de custo	Valor médio (R\$/t)
Empilhamento de rejeito filtrado	Filtragem dos rejeitos	4,00
	Transporte e empilhamento do rejeito	6,00 a 8,00
Disposição convencional	Disposição do rejeito na barragem	2,00

Nota-se o quão superior é o custo de operação do método de empilhamento de rejeito filtrado quando comparado ao método convencional de disposição de rejeito. Na mineração Casa de Pedra, cada tonelada de rejeito filtrado (base seca) empilhado custa em torno de cinco a seis vezes mais que uma tonelada de rejeito disposto em polpa. Os custos com o manejo do rejeito (transporte e operações de empilhamento) são aqueles que mais impactam o custo total de operação.

5.3 Projeto Aripuanã

O Projeto Aripuanã, da Nexa Resources, consistirá na exploração subterrânea e beneficiamento de zinco, cobre e chumbo, além da produção de ouro e prata, metais associados aos concentrados de chumbo e cobre. Esse projeto está localizado na Serra do Expedito, a aproximadamente 25 km da cidade de Aripuanã, no noroeste do estado de Mato Grosso, e a uma distância de 959 km da capital Cuiabá. Esse será, provavelmente, o maior projeto de mineração do estado do Mato Grosso, com um total de investimento de US\$ 392 milhões.

A produção prevista para o Projeto Aripuanã é de 1,8 milhão de toneladas por ano (Mta) de minério bruto e 94 mil toneladas de concentrados, com vida útil mínima prevista de 15 anos.

O projeto inicial, de 2007, além de prever a lavra do corpo Arex a partir de cava a céu aberto, como mostra a Figura 5.14, previa também a disposição de rejeitos pelo método convencional, por meio de um dique fechado para conter todo o volume de rejeitos gerados durante a vida útil do empreendimento.



Figura 5.14 – Primeira versão (de 2008) do plano diretor do projeto prevendo disposição convencional de rejeitos e cava a céu aberto para lavra do corpo Arex. (Geominas, 2017b)

A partir da retomada do projeto em 2012, foi reconsiderada a alternativa a ser utilizada para a disposição dos rejeitos gerados pelo empreendimento. Decidiu-se, então, pelo método de empilhamento de rejeitos filtrados. Alguns dos benefícios apontados pela empresa são a ocupação de uma menor área, maior segurança conquistada na operação, e posterior facilidade de descomissionamento.

Nesse novo projeto a empresa optou também pela lavra de todos os corpos por meio de mina subterrânea. O método selecionado para lavra foi o *Bench Stopping*, o qual consiste numa variação do método *Sublevel Stopping* usando o enchimento para apoiar as paredes do realce. O projeto prevê que parte do rejeito e a porção majoritária do material estéril serão utilizados como material de enchimento. Isso reduzirá os volumes de rejeito e estéril a serem dispostos em superfície. Para ser utilizado como *backfill* o rejeito gerado na planta de beneficiamento proveniente da flotação será adicionado a até 6% de cimento, que servirá tanto para consolidação do material quanto para imobilização dos sulfetos que porventura possam existir nesse material.

Estima-se que, durante toda a vida útil do empreendimento, um total de 19,1 milhões de toneladas de rejeito retornarão à mina na forma de *backfill*. Já a quantidade de estéril prevista para ser disposta na pilha em superfície é de aproximadamente 600 mil toneladas.

A infraestrutura do projeto prevê, além da mina subterrânea (corpos Arex e Ambrex) e das estruturas de praxe, a construção de quatro pilhas de rejeito filtrado. A Figura 5.15 traz um *layout* da localização das principais estruturas.

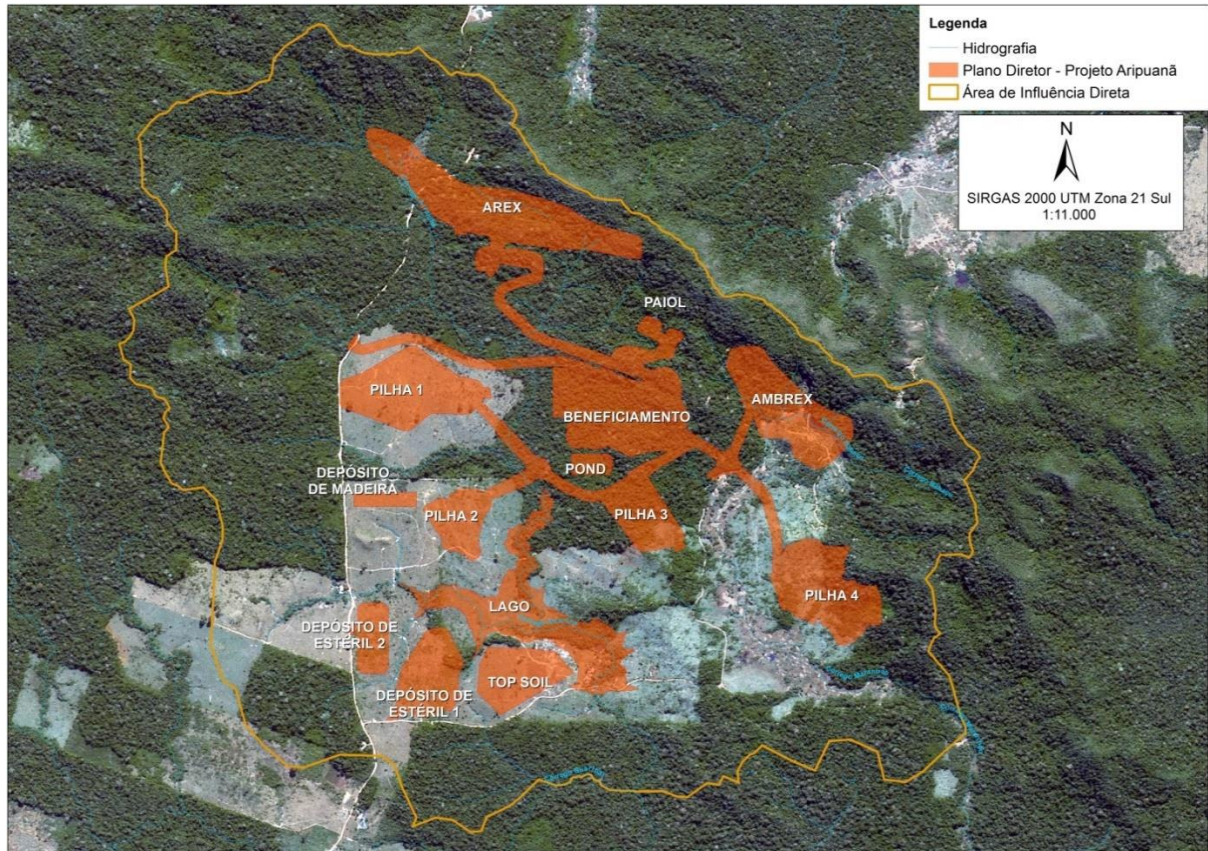


Figura 5.15 – Layout com localização das principais estruturas presentes no atual Plano Diretor do Projeto Aripuanã. (Geominas, 2017b)

A partir da lavra, é previsto que o minério seja transportado por LHDs, empilhado na entrada da mina e, em seguida, transportado por caminhões rodoviários até a planta de beneficiamento.

Os rejeitos gerados na etapa de flotação consistem basicamente em três tipos: rejeito de talco, rejeito de cobre e rejeito de zinco. O rejeito da flotação de cobre ou o rejeito da flotação de zinco, após passarem por amostradores, serão bombeados para um espessador, cujo *underflow* será misturado ao rejeito do talco no tanque de alimentação da planta de filtragem. A partir desse tanque, o material será bombeado até a planta de filtragem. Serão três filtros operando na filtragem de rejeito e um filtro reserva. A água recuperada na filtragem será bombeada para a caixa de água recuperada que retorna para o processo, enquanto o material da torta filtrante, contendo 15% de umidade, será transportado para disposição na pilha de rejeitos ou para utilização como *backfill*.

Os rejeitos serão então transportados por correias até a área de armazenagem temporária. Em seguida, esse material será carregado em caminhões rodoviários, com o

auxílio de pá carregadeira, e transportado para a pilha de rejeitos filtrados ou para a preparação de *backfill*. Cada pilha de rejeito filtrado terá uma via de acesso principal, a partir da planta de beneficiamento, contendo 6,0 m de largura e inclinação máxima de 6%, com um raio de curvatura mínimo de 30 m. Outro sistema de filtros realizará a filtragem de material destinado especificamente para o *backfill*. Os fluidos filtrados e o *overflow* do espessador serão bombeados para a lagoa de água industrial recuperada para posterior reutilização na planta.

Considerando os resultados de ensaios, os rejeitos provenientes do material com predomínio de minério *stratabound* (tipo de minério com litologia em camada ou estrato sedimentar) foram classificadas como Resíduo Perigoso Classe I devido à concentração de chumbo no extrato lixiviado, que é um metal encontrado naturalmente nas rochas da região da serra do Expedito. As demais amostras de rejeitos foram classificadas como Resíduo Não Perigoso não inerte - Classe IIA.

As quatro pilhas de rejeitos irão conter canais perimetrais revestidos, para coleta e destinação da drenagem das pilhas de rejeitos filtrados para os *ponds* (ou poços) de coleta, situados no entorno das pilhas. A partir desses *ponds*, o efluente coletado será monitorado para eventual descarte ou bombeamento para o *pond* de água recuperada.

O projeto prevê a seguinte sequência para construção de cada uma das pilhas, segundo GEOMINAS (2017a):

- Locação dos limites do espaldar final das pilhas;
- Supressão vegetal na área do espaldar das pilhas;
- Remoção de solo vegetal na área do espaldar das pilhas;
- Tratamento de fundações de acordo com o projeto de cada pilha;
- Execução de dique de estéril compactado (berma);
- Execução de solo compactado a 98% do Proctor Normal sobre dique de estéril compactado;
- Execução de sistema de detecção de vazamentos;
- Execução de canal de coleta de efluentes;
- Execução de bacia impermeabilizada de coleta de efluentes;
- Execução de sistema de impermeabilização da pilha;
- Execução de sistema de drenagem interna;

- Formação da pilha com execução de aterro com rejeitos compactados a 95% do Proctor Normal;
- Execução de camada de cobertura em argila compactada a 98% do Proctor Normal;
- Implantação de geocomposto drenante;
- Construção dos sistemas de drenagem superficial;
- Execução de sistema de cobertura superficial.

A estimativa de geração total de rejeitos ao longo da vida útil da mina é de 35,5 Mt, sendo que 19,1 Mt serão destinados ao *backfill* e 16,4 Mt terão as pilhas como destino final. O projeto prevê a operação simultânea em duas pilhas, de maneira a dar flexibilidade operacional para a disposição do rejeito, permitir a conformação das drenagens intermediárias e a compactação necessária do depósito. Assim, no início da operação prevê-se a construção das pilhas **1** e **3** em paralelo. De maneira a não interromper a produção de rejeito, as pilhas **2** e **4** serão iniciadas pouco antes do preenchimento total das duas primeiras. A Tabela 5.2 traz os volumes das pilhas de rejeitos filtrados.

Tabela 5.2 – Volumes e áreas ocupadas por cada uma das pilhas previstas para o Projeto Aripuanã. (GEOMINAS, 2017a)

Pilha	1	2	3	4
Volume (Mm³)	3,8	0,9	0,7	3,1
Área (ha)	22,32	8,97	10,51	21,22

Cada uma das pilhas terá altura máxima de aproximadamente 57 m acima da superfície revestida com geomembrana. Cada banco da pilha de rejeito terá 10 m de altura média, com o talude de cada camada construído na proporção de 2H:1V e bermas de 7 m de comprimento. A Figura 5.16 traz uma vista em corte da Pilha 1 e a Figura 5.17 apresenta detalhes da região demarcada “Detalhe 1” nessa mesma seção. As figuras destacam a utilização de mantas de HDPE (ou PEAD - polietileno de alta densidade) para revestimento da base das pilhas e dos canais de efluentes e destacam, também, a camada selante de argila compactada na base da pilha de rejeitos. O revestimento da base da pilha com manta PEAD e camada de argila compactada se deve, principalmente, à necessidade de se evitar a infiltração de drenagem proveniente da pilha, devido à possibilidade de lixiviação de chumbo acima dos níveis regulamentares.

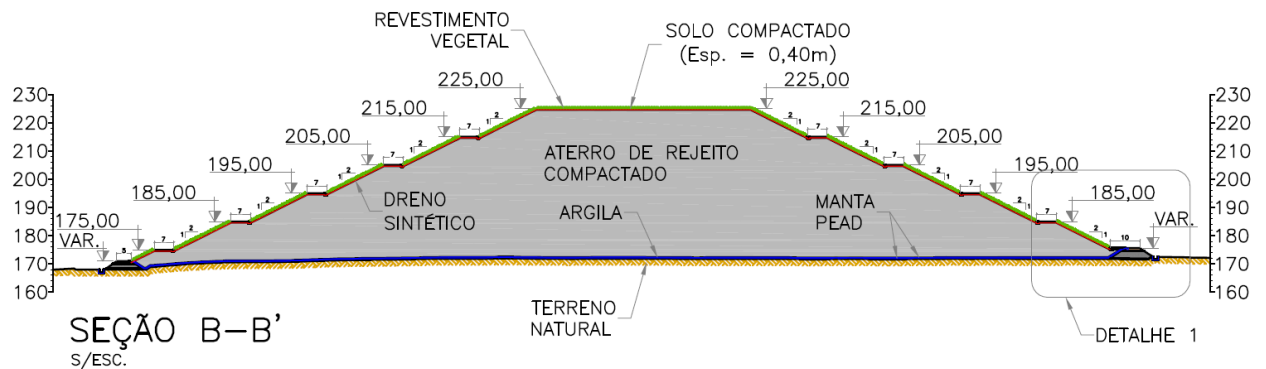


Figura 5.16 – Seção B-B' da Pilha 1 do Projeto Aripuanã (GEOMINAS, 2017a)

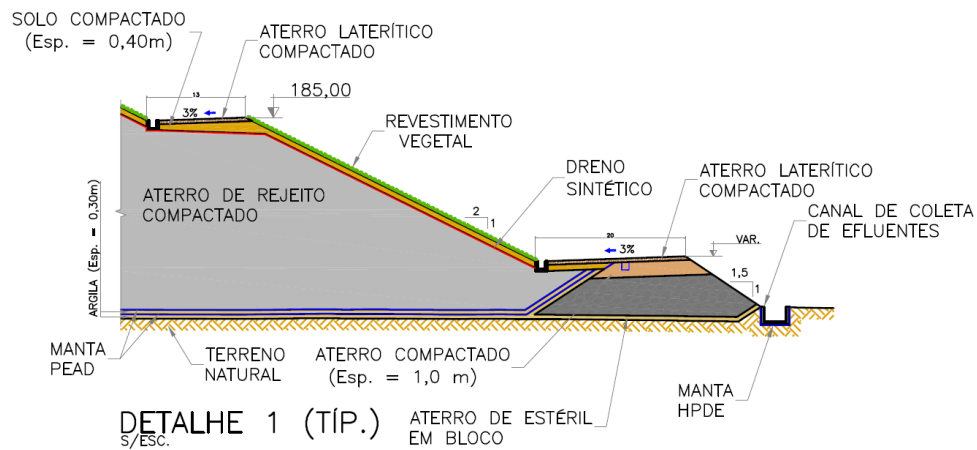


Figura 5.17 – Detalhe 1 da Seção B-B' mostrando detalhes de estruturas previstas para a Pilha 1 (GEOMINAS, 2017a)

O projeto também prevê um sistema de coleta de águas superficiais descarregando no canal de coleta de efluente, que, por sua vez, descarrega na bacia de coleta de efluente, para posterior bombeamento ao *pond* de água industrial recuperada e tratamento na ETEI.

As quatro pilhas terão sistemas de detecção de fugas, instalados abaixo da camada de impermeabilização, com a finalidade de capturar eventuais vazamentos. O sistema de detecção de fugas consistirá em tubulações perfuradas de HDPE (*Highdensity Polyethylene*, ou PEAD – polietileno de alta densidade), de parede dupla, de 100 mm de diâmetro. As tubulações serão colocadas em uma trincheira preenchida com areia/pedra para facilitar a drenagem. As trincheiras terão 600 mm de profundidade (mínimo) e largura variável de acordo com o diâmetro da tubulação, sendo o interior da trincheira preenchido com areia/pedra para drenagem.

Os *ponds* ou poços de detecção de fugas serão construídos em quantidade adequada no entorno de cada pilha, considerando as características de cada uma delas, podendo chegar a 6 para a Pilha de Rejeitos 1. Nesses locais a água será monitorada, e caso não seja detectada contaminação, será descartada para a barragem de água. No caso de ser detectada a presença de algum elemento contaminante, a água será encaminhada ao *pond* de água recuperada e em seguida será direcionada à estação de tratamento de efluente antes de ser usada no processo ou descartada.

As bacias de coleta de efluente (ou *pond* de coleta), construídas na parte inferior de cada pilha de rejeito filtrado, armazenarão as vazões dos sistemas de coleta de líquidos internos das pilhas e vazões do sistema de coleta de águas superficiais das pilhas, as quais serão transportadas por gravidade pelo canal de coleta de efluentes. As bacias de coleta de efluentes serão revestidas por uma camada de geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura e terão capacidade compatível com a capacidade volumétrica de cada pilha.

Sobre a superfície final de rejeito compactado será implantada uma Georrede drenante de PEAD, com espessura de 5,0 mm, sendo acoplada uma membrana de geotêxtil não-tecido a uma de suas faces. Sobre este dreno sintético, é prevista a execução de uma camada de argila compactada com 40 cm de espessura, com a finalidade de garantir o isolamento dos rejeitos com relação ao meio externo. Após essa camada de argila, será executado revestimento vegetal, podendo ser grama em placas ou hidro-semeadura. Nas bermas e acessos será executada camada de revestimento laterítico para proteção mecânica.

Para o monitoramento geotécnico das pilhas de rejeito serão utilizados marcos de recalque superficial, estacas de concreto e placa indicadora de vazões, instalados nas pilhas e monitorados conforme programa próprio.

As pilhas de rejeito serão formadas por rejeito compactado a 95% do Proctor Normal em camadas de espessura máxima de 25 cm, considerando o material solto. Para as análises de estabilidade das pilhas foram considerados parâmetros médios de resistência e condições médias de comportamento. Foram realizadas análises de estabilidade em termos de tensões totais, tendo como referência a seção de maior altura. Como condição de saturação foi simulada a máxima freática admissível, apesar de não ser esperada formação de linha freática no interior da pilha, devido à baixa permeabilidade dos rejeitos após compactação dos mesmos. As análises de estabilidade indicaram resultados satisfatórios, mesmo considerando-

se a condição crítica de saturação. Os fatores de segurança mínimos obtidos na análise estavam em acordo com os valores mínimos admissíveis. Para a análise foram utilizados os seguintes valores médios para o rejeito compactado: coesão igual a 50 kPa, ângulo de atrito de 23°, peso específico natural igual a 22kN/m³ e peso específico saturado de 24 kN/ m³.

5.4 Mina Escobal (Guatemala)

Mina subterrânea de ouro, prata, chumbo e zinco localizada na Guatemala. Adquirida em 2019 pela Pan American Silver. A mina operava, em 2014, a uma taxa de produção de minério diária de 3.500 toneladas. Estava sendo realizado um estudo de viabilidade para o aumento da taxa de produção para 4.500 t/d (M3 Engineering, 2014). O início das operações se deu entre 2013 e 2014.

A mina Escobal está localizada no sudeste da Guatemala, a aproximadamente 40 km da Cidade da Guatemala. Coordenadas UTM 806,500E 1,601,500N. A área total dentro das fronteiras da mina é de aproximadamente 100 ha. A Figura 5.18 destaca a localização da Mina Escobal.



Figura 5.18 – Mapa da Guatemala destacando a localização da Mina Escobal (M3 Engineering, 2014)

As reservas provadas e prováveis da Mina Escobal totalizam 31,4 milhões de toneladas com teores médios de 347 g/t de prata, 0,33 g/t de ouro, 0,74% de chumbo e 1,21% de zinco.

Metade do rejeito gerado na Mina Escobal é filtrado até atingir o teor de umidade em torno de 13%. A água recuperada durante a filtragem retorna ao processo, diminuindo a necessidade de utilização de água nova. A outra metade é transportada para outra planta onde é misturada com cimento e água para ser utilizado como *backfill* (enchimento) na mina subterrânea. São apontadas algumas das vantagens de utilização do rejeito como *backfill* segundo M3 Engineering (2014):

- Oferece maior estabilidade ao trabalho subterrâneo, aumentando a segurança e reduzindo a possibilidade de a superfície apresentar zonas suscetíveis à subsidência;
- Oferece uma oportunidade de encapsular qualquer material proveniente do desenvolvimento com potencial de gerar substâncias ácidas, isolando-o da água e do oxigênio, evitando assim o potencial de lixiviação de metais ou geração de ácido;
- Proporciona a redução da área de armazenamento necessária na superfície (*footprint*).

A caracterização geoquímica dos resíduos de rochas e rejeitos demonstrou a não existência de metais deletérios que excedam os limites previstos nos regulamentos. As amostras de rochas residuais e rejeitos são coletadas de forma sistemática e regular, com resultados consistentemente favoráveis, indicando quase nenhum potencial para geração de drenagem ácida.

O clima local consiste em duas estações principais: uma estação “chuvosa” entre maio e novembro e uma estação “seca” entre novembro e maio, como pode ser visto na Figura 5.19. As atividades de mineração e exploração são realizadas o ano todo sem interrupções relacionadas ao clima. A precipitação média do mês Fevereiro, o mês mais seco, é de 6 mm. Já setembro é o mês mais chuvoso com uma média de 321 mm. A pluviosidade média anual é de 1631 mm.

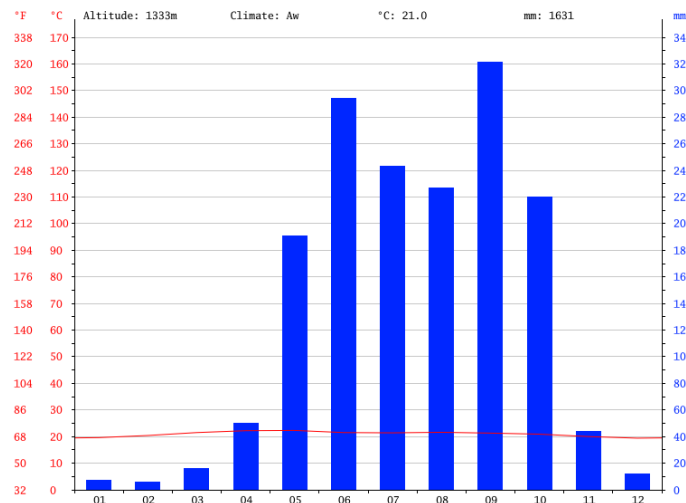


Figura 5.19 – Precipitação média por mês em San Rafael Las Flores, a 3 km da Mina Escobal (climatedata.org, 2019)

A polpa de rejeito que sai da planta de flotação é processada em um espessador *high rate* de 16 metros de diâmetro. O processo de sedimentação do rejeito no espessador é acelerado pela adição de floculantes. O *underflow* do espessador é direcionado, por gravidade, para alimentar a planta de filtragem enquanto o *overflow* vai, também por gravidade, para uma planta de tratamento de água. O rejeito que sai da flotação contém cerca de 25% de sólidos em massa. Já o material do *underflow* do espessador contém por volta de 60% de sólidos em massa.

Na planta de filtragem existem três bombas centrífugas para realizar o direcionamento dos rejeitos espessados para o interior dos três filtros prensa existentes. Cada bomba é acionada por um motor de frequência variável de 336 kW, capaz de fornecer 750 m³ de polpa por hora. A Figura 5.20 traz um esquema simplificado do processo.

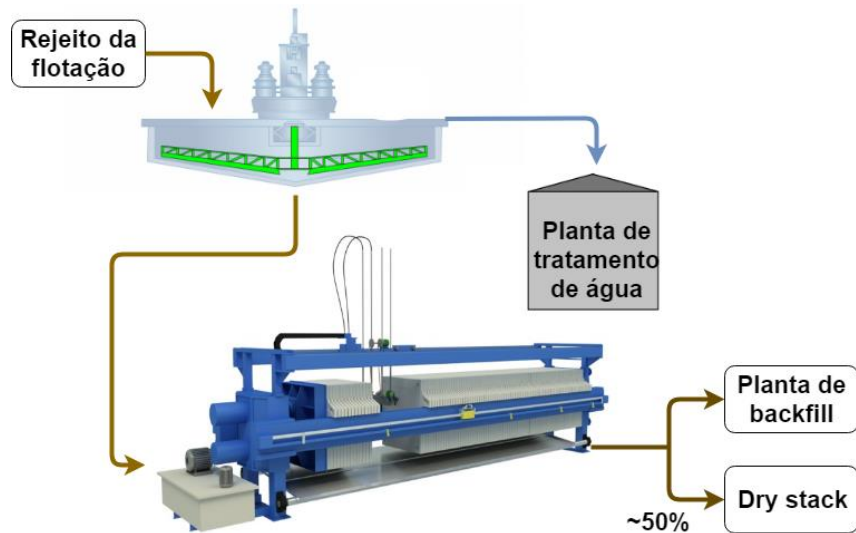


Figura 5.20 – Rota simplificada do rejeito na Mina Escobal (Elaborada pelo autor, 2019)

Cada um dos três filtros, modelo Diemme GHT 2000, tem taxa média de produção de rejeito de 85 t/h de rejeito e produz uma torta com teor de umidade de aproximadamente 13%.

Ao fim de cada ciclo de filtragem a torta filtrante cai sobre uma correia transportadora dedicada que levará o material a duas correias coletoras distintas: uma para a planta de pasta de *backfill* e outra para a empilhadeira radial do sistema *dry stack*, mostrada na Figura 5.21. Cada um dos caminhos recebe cerca de 50% do material filtrado total.



Figura 5.21 – Empilhadeira radial para estocagem temporária do rejeito filtrado antes da pilha (M3 Engineering, 2014)

O sistema de correias para a planta de fabricação da pasta de *backfill* consiste em duas correias transportadoras cobertas. A primeira é acionada por um motor de 56 kW, possui um metro de largura e 542 metros de comprimento. A segunda possui as mesmas medidas da

primeira e é acionada por um motor de 112 kW. A Figura 5.22 traz um layout com a localização de algumas das principais estruturas relacionadas à rota dos rejeitos.

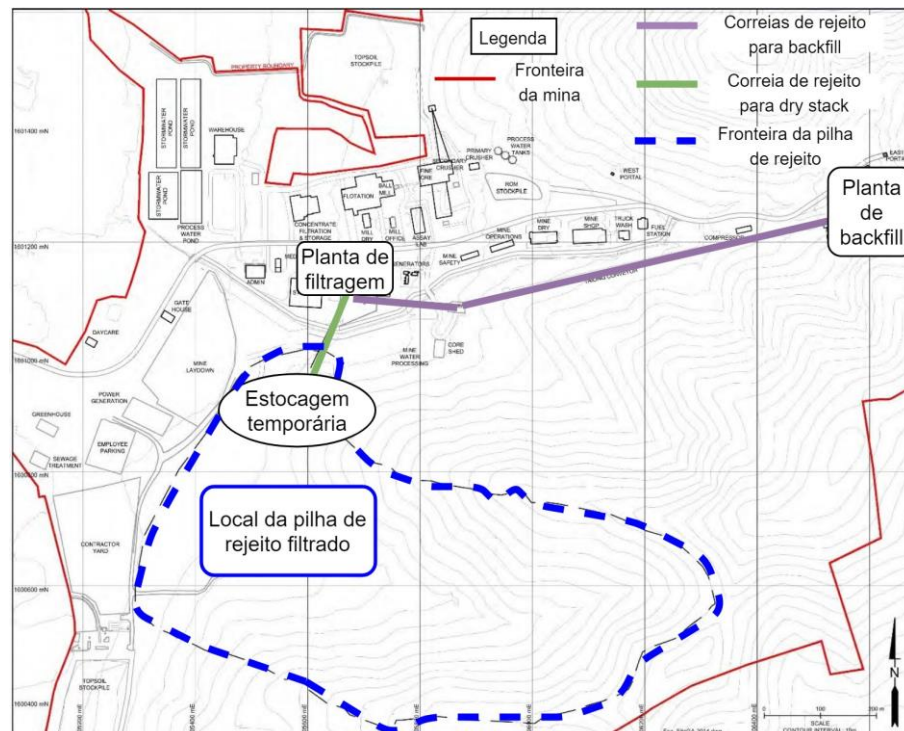


Figura 5.22 – Layout com a localização de principais estruturas relacionadas ao rejeito (Adaptado de M3 Engineering, 2014)

Após a estocagem temporária no local onde se encontra a empilhadeira radial, o material filtrado é transportado por caminhões até a pilha, depois é espalhado e compactado em camadas relativamente finas no interior da área limitada pelas bermas previamente construídas com rochas de material estéril. A Figura 5.23 mostra os trabalhos de preparação da área acontecendo em simultâneo com a disposição de rejeitos.



Figura 5.23 – Empilhamento e preparação do local ocorrendo em simultâneo no local de disposição de rejeitos filtrado da Mina Escobal (M3 Engineering, 2014)

Antes receber o rejeito, a área da pilha é preparada, retirando-se e estocando-se o solo orgânico para ser utilizado posteriormente na fase de recuperação final. Além disso, para a preparação do local, foram colocados drenos de fundo e as rochas que formam os contrafortes do perímetro da pilha.

A pilha de rejeito filtrado será construída e operada durante os dezoito a vinte anos de vida útil previstos para a mina. Um sistema de drenagem composto por canaletas desvia o escoamento de águas superficiais de todo entorno da pilha para uma bacia de decantação, evitando-se a erosão da pilha. Além disso, águas subterrâneas rasas e águas superficiais que entram em contato com o material da pilha são interceptadas por uma coluna central de drenagem abaixo da superfície e por drenos nas linhas de talvegues principais. Esses fluxos de águas são capturados, armazenados e depois bombeados para o tratamento, se necessário, e para utilização no processo.

A pilha vem sendo recuperada na medida em que prosseguem os trabalhos para sua construção. À medida que camadas sucessivas vão sendo depositadas e compactadas no interior de bermas perimetrais de rochas, as faces inferiores da pilha recebem o solo orgânico armazenado e vão sendo revegetadas gradativamente, como pode ser visto na Figura 5.24. A recuperação simultânea da pilha de rejeitos filtrados está em andamento desde os primeiros anos de operação da mesma. Dessa forma, em todas as etapas da operação, a face externa da pilha será vista como um talude contendo vegetação que replica as inclinações naturais do entorno da mina.



Figura 5.24 – Recuperação simultânea da pilha de rejeitos filtrado (M3 Engineering, 2014)

A estabilidade estática e sísmica da pilha é aprimorada pelos seguintes fatos: (a) os rejeitos são desaguados até um ponto em que não sejam potencialmente liqueficáveis; (b) os rejeitos são compactados no local para aumentar a densidade e a resistência; e (c) a compactação da superfície superior limita a infiltração da água da chuva nos rejeitos (M3 Engineering, 2014).

A Guatemala se encontra em uma região do globo com grande chance de ocorrência de terremotos. Por isso, o relatório aponta que foram feitos estudos probabilísticos e determinísticos para verificar a estabilidade da pilha de rejeitos em caso de ocorrência de eventos sísmicos. Dentro desses estudos foram levados em conta diferentes cenários de abalos sísmicos e em todos eles a deformação computada para a pilha esteve dentro dos limites toleráveis. Espera-se que ao final dos trabalhos de fechamento, a partir do plantio de espécies nativas e pés de café, a pilha de rejeitos tenha aspecto similar às encostas presentes no entorno da mesma.

O sistema de empilhamento dos rejeitos filtrados inclui os seguintes componentes, segundo M3 Engineering (2014):

- Correia transportadora: realiza o transporte dos rejeitos filtrados da planta de filtragem para a base da empilhadeira radial;
- Empilhadeira radial: forma pilhas de rejeitos filtrados que são depois transportados por caminhões até o local de disposição na pilha;
- Face frontal (talude) da pilha: a face da pilha aumenta em uma inclinação de três na horizontal para um na vertical (3H:1V) até uma altura final, suficiente para depositar os rejeitos produzidos durante a operação da mina;

- Contrafortes para início da face frontal: contrafortes iniciais de 5 metros de altura construídos com rocha de material estéril da mina, são colocados no perímetro mais externo ao local de deposição de rejeitos filtrados para formar bermas que reforçam a estrutura da pilha. Os bancos intermediários têm inclinação de 1% para que a drenagem ocorra na direção norte;
- Estrada de acesso: avança pela face frontal da pilha para fornecer passagem para caminhões que transportam os rejeitos do pátio de empilhamento temporário para o local de deposição;
- Contraforte do perímetro na base da pilha: reforço da estrutura da pilha constando de rochas de material estéril da mina. Construído nos flancos norte, oeste e sul nas margens do perímetro do *footprint* (pegada) da pilha de rejeito filtrado;
- Controle da água de contato com a superfície superior da pilha: o andar superior da área de trabalho ativa da pilha é inclinado para drenar de norte a nordeste em uma inclinação nominal de 1% em direção aos canais de controle de água da superfície superior;
- Estruturas de gerenciamento de águas superficiais sem contato com os rejeitos: essas foram construídas para interceptar o escoamento superficial e desviar a água da área ao redor da pilha para longe desta.

É realizada uma análise das propriedades geotécnicas dos rejeitos a cada dois a três anos, ou a cada vez que a pilha cresce de 10 a 12 m de altura. Assim é possível prever a provável resposta geotécnica da pilha às cargas estáticas e potenciais cargas dinâmicas (sísmicas). Além disso, está prevista a realização de uma revisão do desempenho das estruturas de controle e desvio de água de superfície da pilha todos os anos. A Figura 5.25 traz uma vista aérea atual da pilha de rejeito filtrado da mina.



Figura 5.25 – Vista aérea da pilha de rejeito filtrado da Mina Escobal (Google Earth, 2019)

Além de água nova, são utilizadas para o processamento as águas provenientes da mina subterrânea e do *overflow* dos espessadores. A água com origem na mina é direcionada a um espessador de 12 metros de diâmetro, onde é adicionado floculante. O *overflow* desse espessador é direcionado para a barragem de água de processamento e o *underflow* é bombeado para o espessador de rejeito. Já o *overflow* dos espessadores de concentrado e de rejeito são destinados à barragem de água de processo. O único tratamento realizado é a adição de peróxido de hidrogênio à água do *overflow* do espessador de rejeitos para destruir o cianeto. A água de processamento não excede os limites dos níveis de contaminantes regulamentados (M3 Engineering, 2014).

A Tabela 5.3 traz um resumo dos custos de capital para o aumento da taxa de produção.

Tabela 5.3 – Custos de Capital para expansão da produção da Mina Escobal (M3 Engineering, 2014)

Área	Item de capital	Custo Total (xU\$1.000)
Mina	AC 282 Jumbo (2)	2.580
	AC Boltec (1)	875
	Simba Longhole Drill (1)	790
	Cubex Drill (1)	1.400
	CAT R2900 LHD (1)	1.400
	CAT R1700 LHD (1)	950
	CAT AD45 Truck (2)	1.960
	Expansão da Planta de Pasta	2.824
	Capital Total de Expansão para a Mina	12.779

Processamento	Britagem primária	650
	Britagem secundária/terciária	137
	Moagem	473
	Flotação	2.109
	Espessador do concentrado	179
	Filtragem de rejeitos	7.512
	Equipamentos para a pilha de rejeito filtrado	475
Capital Total de Expansão para o Processamento		11.535
Capital Total de Expansão		24.314

Os custos de capital totais previstos para o aumento da taxa de produção de 3.500 t/d para 4.500 t/d foram da ordem 24,3 milhões de dólares de julho de 2014 até 2016. Desse valor, U\$7,5 milhões foram destinados para a filtragem de rejeitos e U\$475 mil para a aquisição de equipamentos para a construção da pilha de rejeitos filtrados. O montante complementar foi destinado à aquisição de equipamentos para a mina, para a expansão da planta de pasta de *backfill* e para diferentes etapas do processamento. O novo filtro prensa selecionado para a filtragem de rejeitos na expansão da taxa de produção da mina, modelo Micronics LASTA, tem capacidade de produção de 83 t/h de rejeito filtrado, com uma disponibilidade de 90%. Considerando-se a operação simultânea de todos os 4 filtros prensa, a mina tem capacidade para produção de cerca de 300 t/h de rejeito filtrado.

A partir dos dados da Tabela 5.4, torna-se possível comparar os custos de operação da filtragem de rejeito com os custos de outras operações de processamento. Esses custos levam em conta os gastos médios com energia e mão de obra praticados no ano de 2014 e revelam os custos por tonelada de minério. A operação de filtragem do rejeito apresenta custo médio de U\$ 1,65 por tonelada de minério, valor que representa 8,1% do total de custos operacionais de processamento.

Tabela 5.4 – Custos de processamento da Mina Escobal por área (M3 Engineering, 2014)

Área	U\$ / t de minério
Britagem primária	0,45
Britagem secundária e terciária	0,72
Moagem e Classificação	2,98
Flotação e remoagem	1,46
Filtragem do Concentrado	0,31
Operações da planta de processamento	5,81

Manutenção da planta de processamento	3,42
Filtragem do rejeito	1,65
Laboratório de metalurgia	0,09
Laboratório de ensaios	1,04
Serviços e tratamento de água	0,42
Custos gerais e administrativos das operações de processo	1,89
Auxiliares	0,12
Total de custos operacionais de processamento	20,36

A Tabela 5.5 traz os custos com operações de superfície por tonelada de minério. Esses custos incluem os gastos com: operação na pilha de rejeitos, operação e manutenção de poços de drenagem e de coleta de água, manutenção de estradas e operações de superfície em geral. Cada um desses custos também leva em conta os gastos reais aplicados no ano de 2014 com energia e mão de obra.

Tabela 5.5 – Custos de operações de superfície por tonelada de minério (M3 Engineering, 2014)

Área	U\$ / t de minério
Operações Gerais de Superfície	0,55
Disposição de rejeito (<i>Dry Stack</i>)	1,70
Poços de drenagem (operação e manutenção)	0,21
Custos totais de operações de superfície	2,47

Verifica-se que o valor do gasto médio com transporte e compactação do rejeito filtrado é de U\$ 1,70 por tonelada de minério. A Tabela 5.6 apresenta a média de custos operacionais totais previstos para a vida útil da Mina Escobal.

Tabela 5.6 – Custos totais de operação por tonelada de minério (M3 Engineering, 2014)

Setor	U\$ / t de minério
Mina	37,23
Processamento	20,36
Operações em superfície	2,47
Administrativo e geral	15,06
Custo total de operação	75,13

O custo operacional médio total estimado é de U\$ 75,13 por tonelada de minério. A partir dos dados apresentados na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5 é possível verificar que o gasto total com a disposição de rejeitos filtrados (desde a filtragem até disposição final) é de U\$3,35 por tonelada de minério. Comparando-se esse valor com o valor do custo total de operação apresentado na Tabela 5.6, pode-se verificar que a disposição de rejeito filtrado representa 4,45% do custo total de operação da Mina Escobal.

5.5 Nexa Resources – Unidade Vazante

A Nexa Resources surgiu em 2017 a partir da união entre a Votorantim Metais e a peruana Milpo. Uma das minas pertencentes ao grupo é a unidade de mineração de Vazante, em Minas Gerais, entre as cidades de Paracatu e Patos de Minas, a cerca de 500 quilômetros da capital Belo Horizonte. Em 2018 a unidade Vazante produziu 141 mil toneladas de zinco e 7 mil toneladas de chumbo. A exploração de minério de zinco iniciou em 1969, a partir da lavra a céu aberto. As atividades de lavra subterrânea tiveram início no ano de 1982 e seguem até os dias atuais por meio dos métodos VRM (85%) e corte e enchimento (15%), segundo Silva (2016a). Considerando os projetos de investimento na mina, relacionados ao aprofundamento da mesma, e a expansão dos valores calculados de recursos e reservas, existe a expectativa de que a produção seja mantida em 140 mil toneladas de zinco por ano até 2034.

A Figura 5.26 mostra as médias de precipitação e de temperatura ao longo do ano. Os valores médios foram calculados com base em dados dos últimos 30 anos. O período chuvoso se estende do final de outubro ao final do mês de março, sendo dezembro e janeiro os meses com maior incidência de chuvas. A média de precipitação anual é de 1.698 mm.

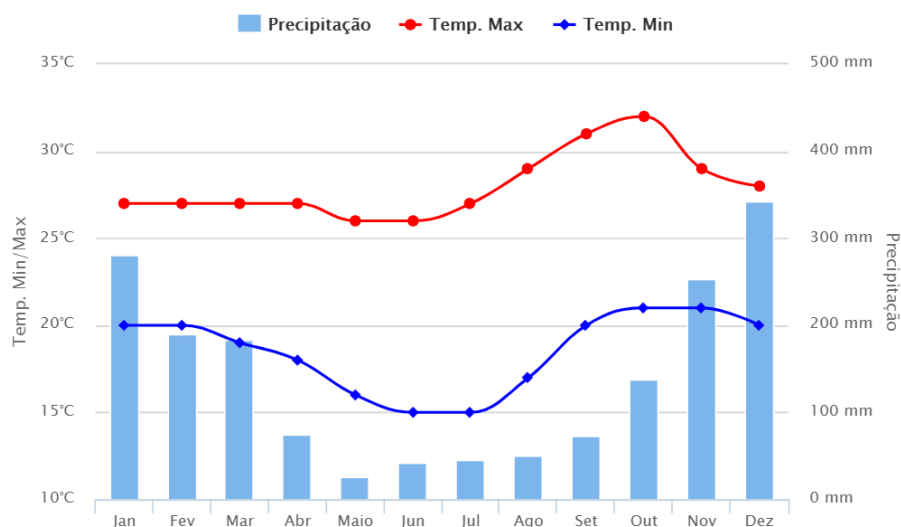


Figura 5.26 – Médias mensais de precipitação e temperaturas na região de Vazante. (Climatempo, 2019)

A disposição de rejeitos acontecia pelo método convencional, com o descarte acontecendo na Barragem Aroeira desde o ano de 2001. Essa barragem passou por 7 alteamentos pelo método de jusante e atualmente apresenta 44 metros de altura, 690 metros de comprimento de crista, 4,7 metros de borda livre e tem a capacidade de armazenamento de 15 milhões de metros cúbicos. Hoje em dia a barragem armazena em torno de 12,2 milhões de metros cúbicos de material, dos quais 11 milhões são de rejeito e o restante é de água. Além de conter os rejeitos, outra função da barragem é receber as águas bombeadas da mina subterrânea e da planta de beneficiamento, para que ocorra a clarificação das mesmas visando posterior recirculação no processo ou lançamento no meio ambiente. A água nova é utilizada apenas para os banheiros e refeitórios.

Atualmente a unidade está em fase final de *ramp up* da planta de filtragem de rejeitos. A ideia inicial desse projeto surgiu em 2012 e estava sendo estudada e amadurecida desde então. O final da vida útil da Barragem Aroeira era, inicialmente, previsto para o ano de 2018. Com o objetivo de prolongar a vida útil da barragem, em 2016, foi implantado um o sistema de espigotamento do rejeito. Essa prática adiou o fim da vida útil da barragem para setembro de 2020.

O projeto para filtragem e empilhamento dos rejeitos surgiu da necessidade de se estender a vida útil da mina em, pelo menos, mais 10 anos. Antes que a alternativa de filtragem de rejeito fosse definida para a mina, também foram cogitadas outras duas alternativas: o alteamento da Barragem Aroeira e a construção de outra barragem em região

fora dos limites de propriedade da mina. Na hipótese de realização do alteamento da Barragem Aroeira haveria a necessidade de aplicação do método de alteamento à montante. Isso porque a base do barramento não poderia se aproximar do leito do Rio Santa Catarina, que corre à jusante da barragem, uma vez que a norma ABNT 10.157 prevê uma distância mínima de 200 metros em relação a cursos d'água. Já na hipótese de construção de uma nova barragem, haveria a necessidade de se adquirir novas terras.

Além disso, o rejeitoduto se estenderia por propriedades de terceiros e as dificuldades para licenciamento e concessões ambientais seriam muito grandes. Já a disposição de rejeito filtrado tem como principal restrição a operação em período chuvoso. Além disso, essa última alternativa é aquela que apresentou menor risco geotécnico, menor risco de projeto, menor impacto ambiental e área de disposição com maior capacidade de volume e menor distância com relação à planta. A Tabela 5.7 traz um comparativo entre os custos previstos para cada uma das alternativas estudadas.

Tabela 5.7 – Comparativo entre os custos das alternativas estudadas para ampliação da vida útil da Unidade Vazante

Alternativa	Nova Barragem	Alteamento da Barragem Aroeira	Empilhamento de rejeito filtrado
CAPEX (R\$)	455 milhões	168 milhões	122,3 milhões
OPEX ANUAL (R\$)	1,8 milhão	3,9 milhões	16,8 milhões

Pode-se perceber que a alternativa de filtragem de rejeitos é aquela que apresentou menor custo de investimento, mas ao mesmo tempo, maior custo operacional. Um detalhamento dos custos de capital necessários à concretização da alternativa de disposição de rejeitos filtrados é mostrado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Detalhamento de custos de capital do empilhamento de rejeitos filtrados da Unidade Vazante

Tipo de despesa	Relação percentual
Definição do Projeto	3,8%
Engenharia Detalhada	1,4%
Gerenciamento (Projeto e Construção)	7,6%
Máquinas e Equipamentos (Nacional/Importado)	23,5%
Material de Instalação (Nacional/Importado)	5,4%
Construção Civil	31,2%
Montagem Eletromecânica	13,8%
Despesas Pré-Operacionais	0,3%
Comissionamento	1,9%
Outros Custos	5,6%
<i>Start-up</i>	0,4%
Contingência	5,1%
TOTAL	100%

A construção da planta de filtragem foi uma obra de *tiro curto*, começando em março de 2018 e com início das atividades em março de 2019. O início do empilhamento de rejeito filtrado em julho de 2019 permitiu a manutenção de um volume livre na Barragem Aroeira capaz de absorver 14 meses de operação da mina. Esse volume poderá ser utilizado para absorver descargas de rejeito em eventuais paradas não planejadas da planta de filtragem de rejeito. A Figura 5.27 traz uma vista aérea destacando algumas das principais estruturas da mina.

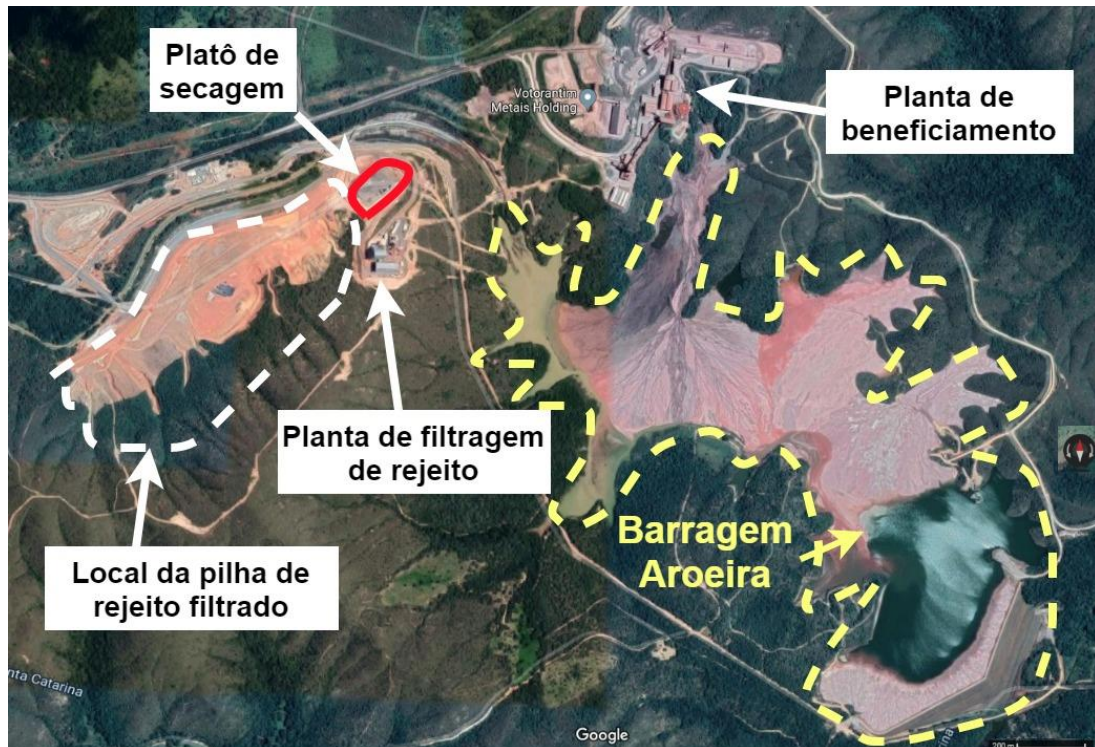


Figura 5.27 – Vista aérea de algumas das principais estruturas da Unidade Vazante. (Google Maps, 2019)

Os rejeitos gerados na planta de beneficiamento são classificados como Classe II A: não apresentam potencial de geração de drenagem ácida nem lixiviação de metais.

Após o bombeamento, a partir da planta de beneficiamento, por meio de uma tubulação de 1,5 quilômetros de extensão, o rejeito, com distribuição granulométrica mostrada na Tabela 5.9, chega à planta de filtragem com 18% de sólidos em massa. Em seguida, um espessador de 22 m de diâmetro e capacidade de 1.260 m³ desagua o rejeito até a faixa de 60% de sólidos em massa, para depois alimentar os filtros. A planta de filtragem contém três filtros prensa (dois deles operando a 100% e o outro em manutenção preventiva/reserva), cada um com 65 placas (2 x 2 m). A planta de filtragem tem uma taxa de produção de rejeito filtrado de 144 toneladas por hora. Havendo a necessidade de aumento da produção, a planta tem capacidade de gerar até 172 toneladas por hora de rejeito filtrado. Os parâmetros de projeto requerem o teor de umidade da torta filtrante descarregada pela planta na faixa de 9 a 11%, meta que, atualmente, vem sendo cumprida.

Tabela 5.9 – Distribuição granulométrica do rejeito da Unidade Vazante

Rejeito da Flotação - Unidade Vazante					
Abertura (#)	Abertura (mm)	Massa (g)	Porcent. Retida Simples	Porcent. Retida Acumulada	Porcent. Passante
65 #	0,212	3,31	0,43	0,43	99,57
100 #	0,148	30,82	4,04	4,47	95,53
150#	0,105	87,17	11,43	15,90	84,1
200 #	0,074	92,68	12,15	28,05	71,95
250#	0,053	48,74	6,39	34,44	65,56
325#	0,044	38,03	4,99	39,43	60,57
400 #	0,037	23,53	3,08	42,51	57,49
<400 #	<0.037	438,55	57,49	100,00	0,00
Total	-	762,83	100,00	-	-

Após o final de cada ciclo o filtro descarrega a torta filtrante numa correia transportadora abaixo dos filtros que, por sua vez, descarrega o material formando pilhas intermediárias em uma área contendo uma cobertura, como se fora um galpão, de 1.300 m², que tem o objetivo de minimizar o impacto da chuva sobre o rejeito filtrado que sai da planta. A Figura 5.28 mostra essas três estruturas: planta de filtragem, correia e galpão.



Figura 5.28 – Planta de filtragem e galpão de estocagem anexo ligados por correia transportadora (Registro feito pelo autor, 2019)

Em caso de condições favoráveis de clima e umidade final da torta filtrante, o rejeito é transportado por caminhões até o local de disposição na pilha. Já em caso de ocorrência de chuvas intensas e/ou por período prolongado, o material filtrado será reservado no galpão e, na possibilidade de o período de chuvas se estender por mais de 15 dias seguidos, o material será transportado até o pátio de armazenamento temporário, com área de 11.150 m², chamado de “platô de secagem”, onde ficará até que seja possível realizar o transporte e disposição final na pilha.

O rejeito também será estocado temporariamente nesse local quando apresentar umidade superior ao requerido para sua compactação na pilha. O platô de secagem fica anexo à pilha, dista cerca de 400 metros da planta de filtragem e se encontra em uma topografia mais baixa em relação a essa última. A Figura 5.29 mostra onde se encontra o platô de secagem em relação à planta de filtragem de rejeito.



Figura 5.29 – Platô de secagem com vista para planta de filtragem (Registro feito pelo autor, 2019)

Na pilha, o rejeito contendo de 9 a 11% de umidade é descarregado na praça de compactação, preferencialmente, de maneira espaçada como mostra a Figura 5.30. Cada praça de compactação tem em média uma área de 2.460 m², dimensão suficiente para receber o volume gerado durante um dia de operação. As dimensões da área são calculadas de forma a comportar a compactação de pelo menos 3 camadas de rejeito (cada uma com espessura de 30 cm).



Figura 5.30 – Exemplo do modo de descarga de rejeito filtrado na pilha (Walm Engenharia, 2017)

Em seguida ocorre o espalhamento do material utilizando-se um trator de esteiras, até que a camada depositada atinja cerca de 35 cm de espessura. A partir daí uma motoniveladora entra em ação para regularizar a plataforma até que a camada obtenha 30 cm de espessura, como mostra a Figura 5.31.



Figura 5.31 – Regularização da camada utilizando-se motoniveladora (Walm Engenharia, 2017)

Para melhor orientação dos operadores de máquinas, são fixadas estacas de madeira de 1,5 m de comprimento contendo marcações a cada 30 cm, como ilustra a Figura 5.32.



Figura 5.32 – Exemplo de estaca fixada para melhor orientação dos operadores da pilha (Walm Engenharia, 2017)

Após a regularização da espessura da camada, o material é gradeado por um trator agrícola, como mostra a Figura 5.33, até que obtenha aspecto homogêneo. Em geral, 3 passadas com o trator agrícola são suficientes. A profundidade do disco no terreno deve ser limitada à espessura da última camada, visando não danificar as camadas já executadas



Figura 5.33 – Gradeamento de camada de rejeito por trator agrícola (Walm Engenharia, 2017)

Em seguida a camada é novamente regularizada pela motoniveladora. Na sequência, a camada é compactada utilizando-se um rolo pé de carneiro, como ilustra a Figura 5.34. Em geral são necessárias 4 passadas com vibração ou 5 passadas sem vibração para a camada atingir a compactação requerida de 95% em relação ao ensaio de Proctor Normal.



Figura 5.34 – Compactação de camada de rejeito utilizando rolo pé de carneiro (Walm Engenharia, 2017)

No caso de ocorrer a indisponibilidade do rolo, o trator de esteiras poderá ser utilizado para realizar a compactação. Porém, a compactação utilizando esse equipamento se restringe às larguras das esteiras, apresentando, assim, baixa eficiência e baixa produtividade se comparado ao rolo pé de carneiro.

Ao final de uma jornada de trabalho, o material compactado é selado a partir da passagem de um rolo liso, como ilustra a Figura 5.35. Em geral, duas passadas com esse equipamento são suficientes. Isso evita tanto a perda de umidade do material, quanto a sua saturação na hipótese de ocorrer um evento chuvoso.



Figura 5.35 – Selamento de camada de rejeito com rolo liso (Walm Engenharia, 2017)

Na hipótese de os trabalhos serem retomados a partir da última camada compactada e selada no dia anterior, a mesma deve ser inspecionada, para verificar se não apresenta trechos com umidade acima de 9% a 11%. Caso seja constatada essa ocorrência, esses trechos com excesso de umidade devem ser retirados pela motoniveladora e armazenados para secagem.

Caso contrário, a camada deverá ser gradeada com trator agrícola e posteriormente compactada com rolo pé de carneiro, antes da disposição de nova camada.

A pilha de rejeitos filtrados será construída com bancadas de 5 metros de altura e terá, ao final da operação, cerca 120 metros de altura e capacidade de armazenamento de cerca de 9 milhões de metros cúbicos de rejeito, A Tabela 5.10 traz um resumo dos principais parâmetros da pilha. O fator de segurança previsto para a pilha é de 1,45.

Tabela 5.10 – Parâmetros construtivos da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante

Pilha de rejeito filtrado	
Área de Abrangência	372.894 m ²
Altura máxima	118,90 m
Altura de bancos	5,0 m
Largura de berma	5,0 m
Geometria da face	1V:2H
Volume estimado	9,25 Mm ³

Foram construídos canais de drenagem periférica, estrutura de drenagem subterrânea e um canal paralelo ao canal de adução (fluxo bombeado para fora da mina subterrânea) direcionando toda a água drenada para a Barragem Aroeira. A pilha deverá ser construída mantendo declividade suficiente para drenar a água superficial para as canaletas de drenagem periféricas (CP1 e CP2). A Figura 5.36 traz um *layout* final da pilha de rejeito em planta e a Figura 5.37 ilustra o layout final em 3D. Os canais periféricos, construídos no contato entre o rejeito e o terreno natural e ilustrados em linha tracejada na Figura 5.36, têm capacidade para 30 mil metros cúbicos por hora e serão ampliados na medida em que a pilha for sendo construída. O curso da drenagem seguirá para a galeria de drenagem, passando pelo canal de drenagem C1 até a barragem.

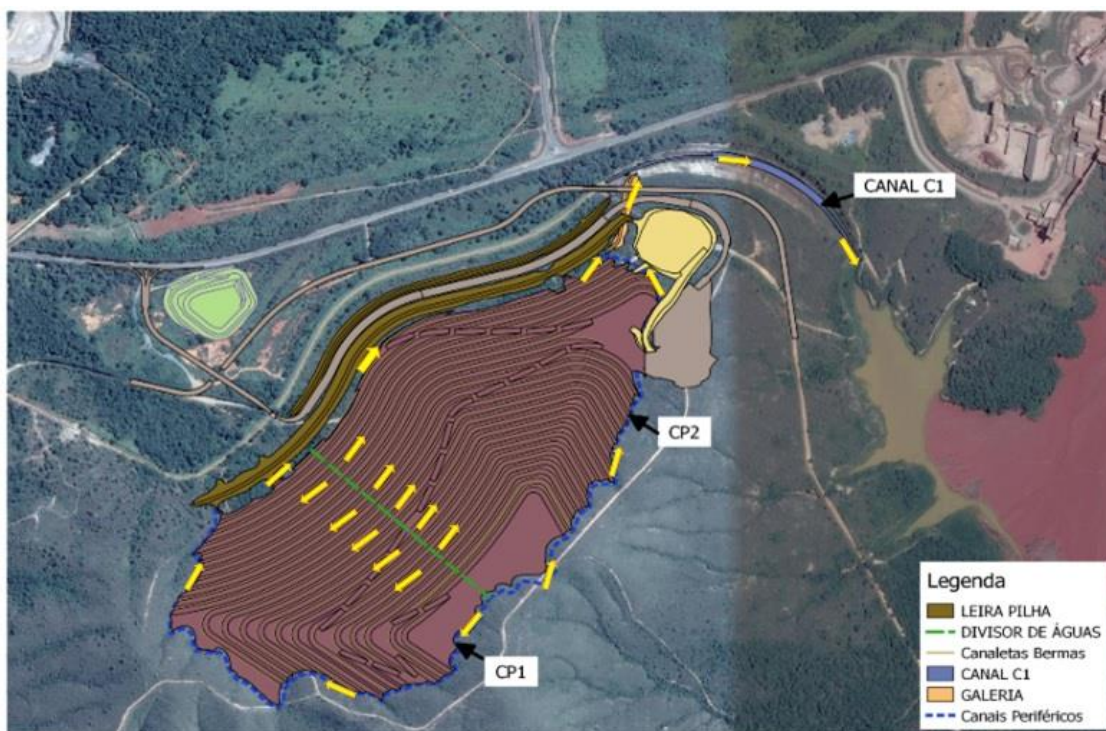


Figura 5.36 – *Layout* final em planta da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante (Nexa Resources, 2017)

Com o objetivo de mitigar a erosão da pilha de rejeitos, a princípio serão utilizados caminhões pipa para umidificação das vias. Na medida em que a pilha for aumentando de tamanho, as bermas mais baixas passarão pelo processo de revegetação, em simultâneo com os trabalhos de disposição de rejeito.

Numa etapa inicial o monitoramento da estrutura será feito com o auxílio de 5 poços de monitoramento da qualidade da água freática e 4 medidores do nível d'água. Até o final da vida útil da pilha de rejeitos filtrados serão instalados: 24 piezômetros, 6 medidores magnéticos de recalque, 19 medidores de nível d'água, 6 medidores de vazão e 21 marcos superficiais.

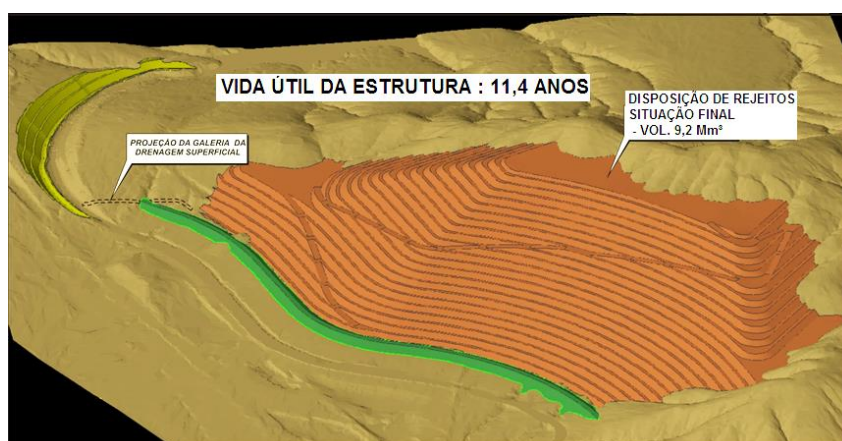


Figura 5.37 – *Layout* final em 3D da pilha de rejeitos filtrados da Unidade Vazante (Nexa Resources, 2017)

A Tabela 5.11 apresenta um detalhamento dos custos operacionais da disposição de rejeito filtrado na unidade. Destacam-se os gastos com aluguel de equipamentos e mão de obra. É possível perceber que a movimentação (transporte) do rejeito filtrado representa 52% do custo total de operação do empilhamento de rejeito filtrado na Unidade Vazante.

Tabela 5.11 – Custos de operação mensais e anuais da disposição de rejeitos filtrados da Unidade Vazante

Custo Variável	Custo mensal (R\$)	Custo anual (R\$)
Energia	178.469,45	2.141.633,39
Floculante	20.251,91	243.022,87
Troca de lonas	26.160,00	313.920,00
Equipamentos para movimentação (aluguel)	567.792,73	6.813.512,76
Combustível (litros de diesel)	238.400,45	2.860.805,38
Subtotal	1.031.074,53	12.372.894,40
Custo fixo		
Mão de obra para movimentação	169.200,00	2.030.400,00
Mão de obra para disposição	93.600,00	1.123.200,00
Mão de obra para manutenção	77.640,00	931.680,00
Custo de manutenção	20.233,33	242.799,96
Locação de veículo pequeno (transporte de operadores)	1.400,00	16.800,00
Consultoria externa	6.666,67	80.000,04
Subtotal	368.740,00	4.424.880,00
TOTAL	1.399.814,53	16.797.774,40

A Tabela 5.12 resume a notável diferença entre os custos operacionais dos dois métodos de disposição: convencional e empilhamento de rejeito filtrado. O custo de operação desse último método é oito vezes superior ao valor praticado na operação do método convencional na Unidade Vazante.

Tabela 5.12 – Comparativo de custos operacionais entre os métodos convencional e de empilhamento de rejeito filtrado para a Unidade Vazante

	Empilhamento de rejeito filtrado (R\$)	Convencional (Barragem) (R\$)
Custo Variável Anual	12.372.894,40	880.753,00
Custo Fixo Anual	4.424.880,00	1.196.960,04
TOTAL ANUAL	16.797.774,40	2.077.713,04
Custo unitário (R\$/t)	13,49	1,68

Nota-se que o Custo Variável Anual da disposição de rejeito filtrado chega a ser 14 vezes o valor praticado no método convencional. Considerando-se o valor do dólar igual a R\$4,00 (quatro reais), a operação do método convencional tem custo unitário igual a U\$0,42/t (quarenta e dois centavos de dólar por tonelada de rejeito) e a operação do método de empilhamento de rejeito filtrado custa U\$3,37/t (três dólares e trinta e sete centavos por tonelada de rejeito). Percebe-se, portanto, o acentuado impacto financeiro causado pelo início da aplicação do método de empilhamento de rejeito filtrado na Unidade Vazante.

Outro fato interessante da Unidade Vazante é a existência de licenciamento já autorizado pela ANM e Supram para início do reaproveitamento do rejeito presente na Barragem Aroeira. Os estudos realizados até o momento indicam que cerca de 5 milhões de metros cúbicos do material presente na barragem tem potencial para ser reprocessado. Atualmente já vem sendo retirado material na parte de montante do reservatório para alimentar a planta de beneficiamento. Os estudos continuam, e um dos objetivos é a definição do melhor método para realizar a lavra do rejeito da barragem (dragas, escavadeira anfíbio...). O rejeito atualmente retirado da barragem vem apresentando teor em torno de 9% de zinco. Em comparação, a alimentação atual da Planta de Beneficiamento gira em torno de 12% zinco. Os 5 milhões de metros cúbicos de material da barragem potencialmente reaproveitáveis apresentam teor médio em torno de 5%.

6. DISCUSSÃO

Neste capítulo são discutidas as principais observações realizadas a partir dos exemplos estudados neste trabalho.

Pode-se perceber que o teor de umidade alvo na filtração de rejeitos poderá ser diferente para tipos distintos de rejeitos. Sendo assim, deverá ser verificado, na fase de projeto, o teor de umidade necessário para viabilizar o manejo e compactação do material considerado. Também é importante considerar a variabilidade do minério e do rejeito ao longo da vida útil da mina. Os principais desafios da filtração estão relacionados à eficiência e aos custos necessários para se atingir a umidade requerida para a disposição final.

Percebe-se que as paradas dos filtros, principalmente para a realização de trocas de elemento filtrante, reduzem a disponibilidade dos mesmos. Dessa forma, a durabilidade do elemento filtrante acaba por controlar muitas vezes a taxa de produção dos filtros.

Ainda a respeito das trocas de placas e elementos filtrantes, a existência de um local, dentro da planta de filtração, contendo placas sobressalentes e uma equipe com a função de realizar a troca de tecidos filtrantes nas mesmas é uma opção bastante interessante e que favorece a taxa de produção da planta de filtração. Dessa forma, as trocas de placas se tornam mais ágeis, aumentando a disponibilidade dos filtros. Além disso, a utilização de talhas (pontes rolantes) para o transporte das placas também agiliza essa atividade.

Em vez de filtrar a classe mais fina de rejeitos separadamente, como sugerem Crystal et al. (2018), as minas Casa de Pedra e Unidade Vazante vêm preferindo filtrar o rejeito total ou realizar uma mistura de rejeitos finos e granulares.

É possível perceber que as operações de transporte e compactação do rejeito são, geralmente, as mais dispendiosas do método de empilhamento de rejeitos filtrados. O transporte utilizando-se caminhões rodoviários é frequentemente utilizado. A redução das distâncias de transporte pode reduzir os custos dessa operação. Dessa forma, a pilha deve ser construída o mais próximo possível da planta de filtração (e vice-versa). A utilização de correias transportadoras logo após a descarga dos filtros, direcionando a torta filtrante até um pátio de estocagem temporária, se mostra como uma boa opção. Deve ser estudada a viabilidade de utilização de correias transportadoras para transporte do rejeito até a pilha de

temporária, levando-se em conta a taxa de produção de rejeitos filtrados. Quanto maior a taxa de produção diária, mais interessante se torna essa opção, dado o custo de capital envolvido.

Ainda que o método de disposição de rejeitos filtrados tenha como um de seus objetivos a independência com relação a barragens para a contenção de rejeitos, são necessárias, pelo menos, algumas estruturas, como baias, nas quais seja possível realizar o descarte do rejeito durante períodos de paradas não programadas da planta de filtragem de rejeitos.

A existência de um pátio de estocagem temporária entre a planta de filtragem e a pilha de rejeitos é de grande importância para absorver o material filtrado com excesso de umidade e durante períodos de chuvas intensas. Esse armazenamento temporário permitirá a secagem por evaporação até o ponto em que seja viável o transporte e compactação na pilha.

Percebe-se a importância da construção de sistemas de drenagem para coletar as águas superficiais do entorno e de contato com a pilha. A construção de drenos de fundo mostra-se, também, interessante para tornar quase nula a probabilidade de o material depositado se tornar saturado e suscetível à liquefação. Locais com alta média de precipitação requerem sistemas de drenagem superficial mais robustos e demandam uma gestão mais intensiva das águas.

Apesar de não ter sido observada, nas minerações visitadas, a divisão da pilha de rejeitos em zonas (estrutural e não-estrutural), essa opção, bem como a utilização de material estéril para construção dos espaldares da pilha de rejeito favorecem a estabilidade dessa estrutura.

Nos casos estudados a filtragem de rejeitos possibilitou a recuperação de cerca de 90% de água. Grande parte da água recuperada retorna ao processo, diminuindo assim a utilização de água nova no processamento de minério. Essa possibilidade de reutilização da água pode tornar o método de empilhamento de rejeito filtrado cada vez mais viável, na medida em que a água se torna um elemento cada vez mais valioso e escasso. Por isso, não se pode abdicar de contabilizar o preço da água nova na análise de viabilidade de aplicação do método de filtragem de rejeitos.

É possível perceber que a reabilitação da área da pilha pode ser feita em simultâneo com a sua construção. Essa possibilidade também favorece a proteção dos taludes e bermas contra a erosão hídrica e eólica.

O reaproveitamento (extração e beneficiamento) de rejeitos depositados tende a se tornar cada vez mais frequente, porque parte do material, que era considerado rejeito, pode apresentar viabilidade para ser utilizado na alimentação das plantas de beneficiamento. O mesmo pode acontecer com o material estéril. Dessa forma, considerando-se o avanço tecnológico e a redução do teor de corte ao longo dos anos, esses materiais podem ser novamente processados para a geração de produtos.

Os custos de capital e de operação para aplicação do método de empilhamento de rejeito filtrado, logicamente, irão depender das características de cada empreendimento. É possível afirmar que o custo de operação desse método será maior que o custo de operação do método convencional. Todavia, o custo de capital do método de empilhamento de rejeito filtrado poderá ser menor, devido, principalmente, ao alto custo relacionado à construção de estruturas robustas de contenção (desnecessárias nesse último método).

Os dados das minas Casa de Pedra e Unidade Vazante mostram que, o custo de operação no método de disposição convencional gira em torno de U\$0,50 (cinquenta centavos de dólar) por tonelada de rejeito (ou R\$ 2,00 por tonelada). Já o custo de operação do método de empilhamento de rejeito filtrado, atualmente, gira em torno de U\$ 2,50 (dois dólares e cinquenta centavos) a U\$ 3,40 (três dólares e quarenta centavos) por tonelada de rejeito (de R\$ 10,00 a R\$ 13,50 por tonelada). Dessa forma, é possível afirmar que o custo de operação do método de empilhamento de rejeito filtrado nessas minerações chega a ser de cinco a oito vezes o custo de operação do método convencional.

A Tabela 6.1 apresenta um resumo dos exemplos apresentados neste trabalho.

Tabela 6.1 – Resumo dos exemplos estudados

Mina	Mina Pau Branco	Mina Casa de Pedra	Projeto Aripuanã	Mina Escobal	Unidade Vazante - Nexa
Local	Minas Gerais	Minas Gerais	Mato Grosso	Guatemala	Minas Gerais
Minério	Minério de ferro	Minério de ferro	Polimetálico	Polimetálico	Polimetálico
Taxa de produção de rejeito (t/h)	300	300 (800 a partir de 2020)	NI	300	144
Tipo e quantidade de filtros	3 Filtros prensa	9 filtros prensa (5 deles em <i>ramp up</i>)	3 filtros (tipo não informado)	4 filtros prensa	3 filtros prensa
Transporte	Caminhões	Correias, empilhadeiras radiais e caminhões	Correias e caminhões	Correias, empilhadeira radial e caminhões	Correias e caminhões
Área para estocagem temporária	Não. Secagem na própria pilha	Sim	Sim	Sim	Sim. Galpão e “platô de secagem”
Umidade do rejeito atingida	15% a 17%	13% a 16%	15%	12% a 13%	9% a 11%
Precipit. anual Média (mm)	1.461	1.472	1.959	1.631	1.698
CAPEX (R\$)	NI	250 milhões	NI	NI	122,3 milhões
OPEX (R\$/t rejeito)	NI	R\$ 10,00 a R\$ 12,00	NI	US\$ 3,35 por ton. de minério	R\$ 13,49
Detalhe interessante da mina	Codisposição em pilha de estéril e lavra de pilha de estéril	Empilhamento em área de antiga barragem de rejeito	Parte do rejeito será utilizada como <i>backfill</i>	Parte do rejeito é utilizada como <i>backfill</i>	Viabilidade para lavra do material da barragem de rejeitos em estudo

Nota: NI – Não Informado

7. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É possível perceber que existe um movimento do setor mineiro no sentido da expansão do método de empilhamento de rejeito filtrado. O método que, há poucos anos, era pouco considerado, sobretudo pelos empreendimentos brasileiros, vem sendo atualmente estudado e implementado em diferentes minerações. Essa tendência parece ter se intensificado diante dos últimos grandes acidentes envolvendo barragens de rejeitos. Isso porque a dificuldade para se obter uma licença para construção ou alteamento de uma barragem de rejeitos se tornou ainda maior e ao mesmo tempo a aceitação desse tipo de estrutura pela sociedade civil se tornou ínfima.

O alto custo de operação de empilhamento de rejeito filtrado pode ser entendido como um dos principais motivos da resistência por parte das empresas de mineração, ao longo dos anos, em aplicarem o método, sobretudo no Brasil. Considerando-se o ambiente altamente competitivo da indústria mineral e a necessidade de diminuir os custos para produção de bens minerais, fica claro que, havendo outras alternativas mais baratas, não seria natural ou espontânea a realização de uma atividade tão custosa com um material que a princípio não traz retorno financeiro, como é o caso do rejeito.

Outro ponto que merece ser destacado é a dificuldade encontrada por pesquisadores na obtenção de informações a respeito da aplicação do método de empilhamento de rejeito filtrado. Esse fato também é relatado em outros trabalhos a respeito dos métodos alternativos de disposição de rejeito. Para a realização deste trabalho isso não foi diferente.

O maior desafio relacionado à aplicação do método de empilhamento de rejeito filtrado continua sendo o elevado custo de operação. Atualmente, nos exemplos estudados, o custo de operação desse método chega a ser de cinco a oito vezes o custo de operação do método convencional. Acredita-se que essa grande diferença entre os custos operacionais venha a diminuir, na medida em que a tecnologia dos equipamentos de filtração se torne cada vez mais desenvolvida e na medida em que a indústria mineira se adapte às especificidades de aplicação desse método.

Já o investimento necessário para a implantação de uma planta de filtração pode ser inferior ao investimento necessário para a disposição convencional de rejeitos.

Quase todo rejeito é filtrável, com diferença da eficiência e dos custos necessários para atingir o nível de umidade requerido para a disposição final. Deve-se aumentar o conhecimento sobre esse material (rejeito), ainda que haja risco menor com a disposição de filtrado. A filtragem e a disposição em pilha são mais sensíveis às variações de características do rejeito em comparação com a disposição convencional.

A codisposição, o retratamento e a utilização do rejeito para preencher escavações de minas subterrâneas (*backfill*) também podem ser estratégias efetivas e devem ser consideradas com suas vantagens e desafios.

Com respeito a detalhes operacionais da disposição de rejeitos filtrados, algumas práticas que favorecem essa operação incluem:

- a existência de um local na própria planta de filtragem contendo placas sobressalentes (em número suficiente para trocas preventivas e corretivas);
- a existência de uma equipe com a função única de realizar as trocas dos tecidos filtrantes;
- a utilização de correias transportadoras para receber a torta filtrante logo após a descarga dos filtros;
- a existência, em local próximo à planta, de um pátio de dimensões suficientes para estocar o material filtrado durante, pelo menos, 10 dias;
- a existência de reservatório(s) (tanques, baias...) que permita(m) a estocagem ou descarte do rejeito em eventuais paradas não planejadas da planta de filtragem;
- a utilização de empilhadeira radial para descarga no pátio de estocagem temporária;
- a existência de sistemas de drenagem que comportem e desviem os fluxos de água superficial e de contato para fora da pilha de rejeitos;
- a maior proximidade possível entre planta de filtragem, pátio de estocagem temporária e pilha de rejeitos;

- a reabilitação progressiva da pilha de rejeitos, prevenindo a erosão da mesma.

Por fim, recomenda-se estudos que poderão contribuir com informações relevantes ao conhecimento em torno do método de empilhamento de rejeitos filtrados:

- Realizar estudos de casos com maior detalhamento das atividades de filtragem e empilhamento de rejeitos;
- Verificar e comparar a eficiência, as taxas de produção e os custos a partir da utilização de diferentes tipos de filtros;
- Estudar os efeitos da variabilidade de determinado(s) características(s) do rejeito;
- Verificar a eficiência e durabilidade de tecidos filtrantes de diferentes fabricantes;
- Estudar opções que favoreçam a redução dos custos de operação do método de empilhamento de rejeito filtrado;
- Verificar sob quais condições o transporte do rejeito filtrado utilizando-se somente correia transportadora se torna mais viável que o transporte por caminhões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos: critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

AUSTRALIA'S DEPARTMENT OF INDUSTRY, INNOVATION AND SCIENCE. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry - Tailings Management. Austrália, 2016.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

AZEVEDO, I. M. A. P.; CERQUEIRA, P. T. P. **Eficiência de um filtro prensa e análise por campo de risco em uma estação de pré tratamento de efluentes industriais**. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, 2017.

BOCCAMINO, G. D. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro** - Estudo de caso para os rejeitos gerados na Instalação de Tratamento de Minérios Itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico. Curso de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2017.

BOSCH, D. W. Retreatment of residues and waste rock. Extractive Metallurgy of Gold in South Africa, p. 707-743. 1987.

BOMAX. **Catálogo de Filtros-Prensa Prensamax**. Taboão da Serra, São Paulo, 2014. Disponível em: <<https://www.bomax.com.br/produtos/item/filtros-prensa-prensamax>> Acesso em 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 13 mar. 2019.

CARNEIRO, A; FOURIE, AB. A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. In: RJ Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2018. Anais[...] p. 439-454.

CONEXÃO MINERAL. Empilhamento de rejeito à seco: alternativa segura que dispensa a barragem. Março de 2019. Disponível em: <<http://www.conexaomineral.com.br/noticia/1265/empilhamento-de-rejeito-a-seco-alternativa-segura-que-dispensa-a-barragem.html>>. Acesso em 2019.

CRYSTAL, C.; CHORE, C.; EZAMA, I. Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018. Anais. Disponível em: <www.srk.ru.com/sites/default/files/file>. Acesso em, 22 de julho 2019.

CSN. Companhia Siderúrgica Nacional. Relatório de Impacto Ambiental. Projeto da pilha de rejeito desaguado e/ou filtrado do Fraile. Mina Casa de Pedra. Sete – Soluções e Tecnologia Ambiental. Congonhas, Minas Gerais, 2017.

DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals**. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals>. Acesso em 2019.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2008.

FERNANDES, R. B. **Metodologia para unificação do sistema de classificação de barragens de rejeito**. 172p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2017.

FERNANDEZ-IGLESIAS ET AL. **Study of environmental feasibility of paste and thickened tailings by life-cycle assessment**. In: PASTE, 2013, Belo Horizonte. Anais. Australian Centre for Geomechanics, Perth. p. 349-363. 2013.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral – Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2014.

FITTON, T.G.; ROSHDIEH A. Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies. In: PASTE, 2013, Belo Horizonte. **Anais**. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2013. p. 275 – 288.

GALVÃO-SOBRINHO, A. R. V. **Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: estudo de caso**. 134p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.

GEOMINAS. Estudo de Impacto Ambiental. Volume 1: Informações gerais sobre o empreendimento. Projeto Aripuanã/MT: Mina subterrânea de polimetálicos. Mineração Dardanelos Ltda. Cuiabá, Mato Grosso, 2017a.

GEOMINAS. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Projeto Aripuanã: Mina subterrânea de polimetálicos. Mineração Dardanelos Ltda. Cuiabá, Mato Grosso, 2017b.

GOLDER ASSOCIATES LTD., **Tailings Storage Facility Life of Mine Feasibility Design**. Mount Polley Mine. Vancouver, BC, Canadá, 2015.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009. 220 p.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil**. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 5. 2016. p. 339-344. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.008>>. Acesso em 2019.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.

GUIMARÃES, N. C.; VALADAO, G. E.S.; PERES, A.E.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 543-548, Dec. 2012. Disponível em <<http://www.scielo.br/scielo>>. Acesso em 15 Mar. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM), **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração; organizador**. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016. 128p.

IN THE MINE (ITM). Geração controlada com destinação segura. Sistemas de gestão, tratamento e destinação de rejeitos da mineração em operações no Brasil. Ano XIV. Nº 81. p. 19-26. 2019

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.

LEGNER, C. **Filtro Prensa no tratamento de água e efluentes**. Revista Meio Filtrante, São Paulo, Edição Nº 85, Março/Abril 2017. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/edicoes.asp?link=ultima&fase=C&id=1139&retorno=c>>. Acesso em 2019.

LUPO. J.; HALL, J. **Dry Stack Tailings – Design Considerations**. Proceedings of International conference, 14th, Tailings and mine waste. Vail, Colorado, Estados Unidos, 2010.

MATEC. Filtragem de rejeitos – estudos de caso. Apresentação no evento “Fornecedores de Tecnologias para gestão e manejo de rejeitos de mineração”. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2019. Disponível em: <<http://portaldamineraacao.com.br/wp-content/uploads/2019/06/05-matec.pdf>>. Acesso em agosto de 2019.

MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project. MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.

MINING MAGAZINE. Stacking up the benefits. Abril de 2017. Disponível em:<<https://www.miningmagazine.com/life-cycle-end-of-life-management/news/1264279/stacking-benefits>>. Acesso em 2019.

M3 Engineering & Technology Corp (M3). Escobal Mine Guatemala – Form 43-101 F1 Technical Report – Feasibility Study. 2014.

NEXA RESOURCES. **Disposição a Seco de Rejeito**. Apresentação. Vazante, Minas Gerais. 2017. 58 slides.

NUNES D.R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2014.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M; LACERDA; C. M. M. **Espessamento e Filtragem.** Apostila. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2004.

OLIVEIRA-FILHO, W. L., ABRÃO, P. Disposição de rejeitos de mineração. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). **Geotecnia Ambiental.** Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA-FILHO, W. L. **Questões Geotécnicas da Lavra de Barragens de Rejeito de Mineração.** Relatório Técnico de Pós-Doutorado no Exterior. UFOP. 2016.

OLIVEIRA-FILHO, W. L. Manejo de Estéreis e de Rejeitos de Mineração. Notas de aula. MIN741. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

OSORIO, C. A. H. **Caracterização de pastas minerais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.

PIMENTA, J. **The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass.** Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 11p., 2011.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.

SILVA, J. M. **Estudo do fluxo de material fragmentado na mineração subterrânea, com o uso de modelos físicos.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

SILVA, J. M. Lavra por corte e enchimento. Notas de aula. MIN114. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2016a.

SILVA, S. A. **Critérios de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa.** Curso de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2016b.

SILVA, J. M. 2020. Comunicação Pessoal. Ouro Preto-MG.

SLR Consulting, Schedule 2 Assessment of Alternatives for Mine Waste Management, Magino Gold Project, Prodigy Gold, Inc. Markham, ON, Canadá, 2016.

TEIXEIRA, D. C. **Benefícios com a utilização de rejeitos em enchimento de minas subterrâneas - uma visão geotécnica e sustentável.** Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2018.

WALM ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL LTDA. Projeto rejeito único Vazante – MG. **Disposição de rejeito a seco - projeto básico (v2):** relatório sobre a metodologia construtiva a ser adotada na pilha de rejeitos. Belo Horizonte. 14 p. 2017.

WILLIAMS, R, ZINK, D; O'BRIEN, S. **Filtered tailings adds value in cost competitive industries,** in A Wu & R Jewell (eds), Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, University of Science and Technology Beijing, Beijing, pp. 363-370. 2017.